



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Caracterización de suelos expansivos de la ciudad de Cuenca

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de
Ingeniero Civil

Autor:

Byron Steven Idrovo Angumba

CI: 0106626666

Directora:

Ing. Karla Johanna Santacruz Reyes, PhD.

CI: 0301731394

Cuenca, Ecuador

07-octubre-2019



Resumen

El desarrollo urbano de la ciudad cada vez invade nuevos terrenos, de donde no existe registro de edificaciones antiguas ni experiencia alguna con el tipo y comportamiento del suelo del lugar. Se vuelve entonces necesario colaborar en la identificación de ciertas zonas que puedan tener problemas al respecto de suelos expansivos. Esta propiedad de los suelos, puede causar daños significativos en las estructuras e inclusive un colapso general. Sin embargo, la expansión de un suelo, no es una propiedad que comúnmente se evalúe dentro del diseño de una estructura, a menos que exista algún indicio al respecto.

El objetivo de la investigación propuesta es identificar suelos con problemas expansivos, dentro de la ciudad de Cuenca y sus alrededores. Se pretende evaluar las características expansivas de estos suelos y contrastar los resultados obtenidos con diferentes métodos de laboratorio y correlaciones empíricas para la caracterización de suelos expansivos que servirán de referencia, al momento de la construcción para realizar un buen diseño de la edificación y en caso de ser necesario la no construcción en estas zonas.

Se analizan cinco suelos ubicados en los sectores de Gapal, Valle, Challuabamba, Sidcay y Miraflores en la ciudad de Cuenca, además uno de la ciudad de Azogues. Estos suelos se clasifican según la SUCS y grado de expansividad como: Arcilla baja plasticidad grado expansivo Medio, Arena arcillosa grado expansivo Bajo, Arcilla alta plasticidad grado expansivo Muy Alto, Arena arcillosa grado expansivo Bajo, Arcilla de alta plasticidad grado expansivo Muy Alto y Arena Arcillosa grado expansivo Bajo respectivamente. Se contrastan ensayos de expansión libre, expansión controlada, ensayo de Lambe y ensayo de expansión libre en probeta, además del análisis de propiedades como límites de Atterberg, gravedad específica, granulometría. Se obtienen correlaciones y recomendaciones al respecto del uso de estos ensayos para la determinación del grado de expansión de un suelo.

Palabras claves: Cuenca. Caracterización. Suelos expansivos. Correlaciones. Ensayos de laboratorio. Grado de expansibilidad.



Abstract

The urban development of the city increasingly invades new lands, where there is no record of old buildings or any experience with the type and behavior of the soil of the place. It becomes necessary then to collaborate in the identification of certain areas that may have problems regarding expansive soils. This property of the soil, can cause significant damage to the structures and even a general collapse. However, the expansion of a soil is not a property that is commonly evaluated within the design of a structure, unless there is some indication in this regard.

The objective of the proposed research is to identify soils with expansive problems, within the city of Cuenca and its surroundings. It is intended to evaluate the expansive characteristics of these soils and contrast the results obtained with different laboratory methods and empirical correlations for the characterization of expansive soils that will serve as a reference, at the time of construction to make a good design of the building and in the case of no construction in these areas.

Five soils located in the Gapal, Valle, Challuabamba, Sidcay and Miraflores sectors in the city of Cuenca are analyzed, as well as one in the city of Azogues. These soils are classified according to the SUCS and degree of expansiveness such as: Low clay plasticity expansive grade Medium, Sand clay expansive grade Low, Clay high plasticity expansive grade Very high, Sand clay expansive grade Low, Clay high expansion grade Very High and Sand clay expansive grade Low respectively. Tests of free expansion, controlled expansion, Lambe test and test of free expansion in test tube are contrasted, in addition to the analysis of properties such as Atterberg limits, specific gravity, particle size. Correlations and recommendations are obtained regarding the use of these tests to determine the degree of expansion of a soil.

Keywords: Cuenca. Soil Characterization. Expansive soils. Empirical Correlations. Laboratory tests. Expansion degree.



Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 Justificación	15
1.2 Antecedentes	15
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1 Objetivo general	16
1.3.2 Objetivos específicos	16
1.4 Alcance	17
2. MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 Suelos expansivos	18
2.1.1 Descripción	18
2.1.2 Proceso de expansión	18
2.1.3 Problemas relacionados	19
2.1.4 Recomendaciones de construcción.....	20
2.1.5 Ventajas	21
2.2 Zonas de estudio	22
2.2.1 GAPAL	23
2.2.2 CHILCAPAMBA.....	24
2.2.3 CHALLUABAMBA	24
2.2.4 SIDCAY	25
2.2.5 MIRAFLORES	26
2.2.6 AZOGUES	26
3. METODOLOGÍA.....	28
3.1 Caracterización	28
3.1.1 Granulometría.....	28
3.1.2 Hidrómetro	29
3.1.3 Clasificación de Suelo.....	30
3.1.4 Gravedad específica de la fase sólida.	31
3.2 Expansividad.....	32
3.2.1 Límites de Atterberg.....	32
3.2.2 Expansión Libre.....	34
3.2.3 Expansión Controlada.....	36
3.2.4 Expansión Libre en probeta	36



3.2.5	Lambe	37
3.3	Correlaciones	39
3.3.1	Tipo de mineral predominante	39
3.3.2	Grado de expansividad	41
3.3.3	Porcentaje y presión de expansión.	44
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
4.1	Caracterización	48
4.1.1	Granulometría.....	48
4.1.2	Hidrómetro	49
4.1.3	Clasificación de Suelo.....	51
4.2	Expansividad	56
4.2.1	Límites de Atterberg.....	56
4.2.2	Expansión Libre.....	57
4.2.3	Expansión Controlada.....	64
4.2.4	Expansión Libre en probeta	67
4.2.5	Aparato de Lambe.....	67
4.3	Correlaciones	68
4.3.1	Tipo de mineral predominante	68
4.3.2	Grado de expansividad.....	70
4.3.3	Porcentaje y presión de expansividad.....	73
4.4	Resumen resultados finales.....	79
4.5	Correlación entre ensayos de expansión	81
4.6	Recomendaciones de ensayos y correlaciones.....	86
5.	CONCLUSIONES.....	89
6.	RECOMENDACIONES.....	92
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	93
8.	ANEXOS	96
	Anexo 1	96
	Anexo 2	97
	Anexo 3	98
	Gapal	98
	Chilcapamba (Valle)	109
	Challuabamba.....	119



Miraflores.....	130
Sidcay.....	141
Azogues.....	151
Anexo 4	161
Ajuste exponencial expansión libre.....	161
Ajuste polinómico expansión libre.....	162
Ajuste exponencial expansión controlada	164
Ajuste polinómico expansión controlada	165
Anexo 5	167
Granulometría.....	167
Hidrómetro	167
Gravedad específica	168
Límites de Atterberg.....	168
Penetración en cono	169
Expansión libre en probeta.....	169
Expansión controlada.....	170
Aparato de Lambe	170



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura Mineralógica: (a) Caolinita, (b) Illita, (c) Montmorillonita (Braja M. Das, 2015).	19
Figura 2. Daños en zonas aledañas a las de extracción de muestras.	20
Figura 3. Empleo de la arcilla en rellenos sanitarios (Ciclo Chile, 2019).	22
Figura 4. Mapa IDE Cuenca (Alcaldía de Cuenca, 2017).	22
Figura 5. Talud de extracción del material en el sector de Gapal.	23
Figura 6. Talud de extracción del material en el sector de Chilcapamba.	24
Figura 7. Sitio del lugar de extracción, urbanización colinas de Challuabamba.	25
Figura 8. Talud de extracción del material.	25
Figura 9. Talud de extracción del material sector Miraflores.	26
Figura 10. Talud de extracción del material.	27
Figura 11. Índice de hinchamiento vs. Cambio de volumen de potencia (UNICAUCA, 2007).	39
Figura 12. Gradiente mineral (Marín Nieto, 1991).	41
Figura 13. Potencial de hinchamiento en función de la actividad de las arcillas (Seed, 1962).	43
Figura 14. Resultados de granulometría por cribado.	49
Figura 15. Resultados granulometría por hidrómetro.	50
Figura 16. Expansión Libre Gapal.	58
Figura 17. Expansión Libre Valle.	59
Figura 18. Expansión Libre Challuabamba.	60
Figura 19. Expansión Libre Sidcay.	61
Figura 20. Expansión Libre Miraflores.	62
Figura 21. Expansión Libre Azogues.	63
Figura 22. Expansión Libre vs Expansión Controlada.	81
Figura 23. Expansión Libre vs Aparato de Lambe.	82
Figura 24. Expansión Libre vs Expansión Libre en probeta.	82
Figura 25. Expansión Controlada vs Aparato de Lambe.	83
Figura 26. Expansión Controlada vs Expansión Libre en probeta.	83
Figura 27. Expansión Libre vs Expansión Controlada.	84
Figura 28. Expansión Libre vs Aparato de Lambe.	85
Figura 29. Expansión Controlada vs Aparato de Lambe.	85



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recomendaciones de construcción sobre la estructura y sistema de cimentación (Vélez, 2012).	20
Tabla 2. Recomendaciones de construcción con acción directa sobre el suelo (Vélez, 2012).	21
Tabla 3. Tamices y abertura serie fina.	29
Tabla 4. Clasificación para expansión libre en probeta (ASTM D 4829).	37
Tabla 5. Parámetros de preparación previa de la muestra al ensayo (UNICAUCA, 2007).	37
Tabla 6. Gravedad específica de los minerales más importantes (Braja DAS, 2001).	40
Tabla 7. Actividad de los minerales de arcilla (Skempton, 1953).	40
Tabla 8. Método de Holtz y Gibbs, función del índice de plasticidad (Holtz y Gibbs, 1954).	41
Tabla 9. Método de Holtz y Gibbs, función del límite de contracción (Holtz y Gibbs, 1954).	42
Tabla 10. Clasificación de suelos expansivos basado en el contenido de coloides, índice plástico y límite de contracción (Holtz y Gibbs, 1956).	42
Tabla 11. Grado de expansividad (Holtz y Dakshanamurthy y Raman, 1973).	42
Tabla 12. Criterios de expansividad recopilados por R. Ortiz 1975.	43
Tabla 13. Grados de expansividad y valores medios de parámetros geotécnicos. (González de Vallejo, 2002).	43
Tabla 14. Grado de expansión (Chen, 1988).	44
Tabla 15. Porcentaje que pasa el tamiz N 200.	49
Tabla 16. Porcentaje de arcilla.	50
Tabla 17. Propiedades clasificación AASHTO Gapal.	51
Tabla 18. Propiedades clasificación SUCS Gapal.	51
Tabla 19. Propiedades clasificación AASHTO Valle.	51
Tabla 20. Propiedades clasificación SUCS Valle.	52
Tabla 21. Propiedades clasificación AASHTO Challuabamba.	52
Tabla 22. Propiedades clasificación SUCS Challuabamba.	52
Tabla 23. Propiedades clasificación AASHTO Sidcay.	53
Tabla 24. Propiedades clasificación SUCS Sidcay.	53
Tabla 25. Propiedades clasificación AASHTO Miraflores.	53
Tabla 26. Propiedades clasificación SUCS Miraflores.	54
Tabla 27. Propiedades clasificación AASHTO Azogues.	54
Tabla 28. Propiedades clasificación SUCS Azogues.	54
Tabla 29. Resumen clasificación suelo.	55
Tabla 30. Resumen tipo de suelo.	55
Tabla 31. Peso específico de la fase sólida.	56
Tabla 32. Resultados Límites de Atterberg.	56
Tabla 33. Penetración cono.	57
Tabla 34. Resultados Expansión Libre Gapal.	58
Tabla 35. Resultados Expansión Libre Valle.	58
Tabla 36. Resultados Expansión Libre Challuabamba.	59
Tabla 37. Resultados Expansión Libre Sidcay.	60
Tabla 38. Resultados Expansión Libre Miraflores.	61



Tabla 39. <i>Expansión Libre Azogues</i>	62
Tabla 40. <i>Resultados expansión libre</i>	63
Tabla 41. <i>Expansión Controlada Gapal</i>	64
Tabla 42. <i>Expansión Controlada Valle</i>	64
Tabla 43. <i>Expansión Controlada Challuabamba</i>	65
Tabla 44. <i>Expansión Controlada Sidcay</i>	65
Tabla 45. <i>Expansión Controlada Miraflores</i>	66
Tabla 46. <i>Expansión Controlada Azogues</i>	66
Tabla 47. <i>Resultados expansión controlada</i>	67
Tabla 48. <i>Expansión Libre en Probeta</i>	67
Tabla 49. <i>Aparato de Lambe</i>	68
Tabla 50. <i>Tipo de mineral predominante</i>	69
Tabla 51. <i>Resumen mineral de arcilla</i>	70
Tabla 52. <i>Grado de expansividad</i>	71
Tabla 53. <i>Grado de expansividad según autores que incluyen ensayos de expansión</i> . ..	71
Tabla 54. <i>Resumen de resultados de grado expansividad</i>	72
Tabla 55. <i>Resumen resultados de grado expansividad</i>	72
Tabla 56. <i>Bibliografía que concuerda con los resultados de grado de expansividad final</i> . 72	
Tabla 57. <i>Porcentaje de expansión Seed (1962)</i>	73
Tabla 58. <i>Presión de expansión, Komornik y David (1969)</i>	73
Tabla 59. <i>Porcentaje de expansión, Vijayvergiya y Ghazzaly (1973)</i>	74
Tabla 60. <i>Porcentaje de expansión Nayak y Christensen (1979)</i>	74
Tabla 61. <i>Presión de expansión y porcentaje de expansión Schneider y Poor (1974)</i>	75
Tabla 62. <i>Porcentaje de expansión Chen (1988)</i>	75
Tabla 63. <i>Porcentaje de expansión Basma (1996)</i>	76
Tabla 64. <i>Presión de expansión Erguler y Ulusay (2003)</i>	76
Tabla 65. <i>Porcentaje de expansión y presión de expansión Sabtan (2005)</i>	77
Tabla 66. <i>Resumen porcentaje de expansión</i>	77
Tabla 67. <i>Errores de las correlaciones con respecto al porcentaje de expansión libre</i>	78
Tabla 68. <i>Resumen resultados de presión de expansión</i>	79
Tabla 69. <i>Errores de las correlaciones con respecto a la expansión controlada</i>	79
Tabla 70. <i>Clasificación grado de expansividad según expansión libre y expansión controlada</i>	80
Tabla 71. <i>Resultado final de valores de expansividad</i>	80



Cláusula de Propiedad Intelectual

Byron Steven Idrovo Angumba, autor del trabajo de titulación "Caracterización de suelos expansivos de la ciudad de Cuenca", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 07 de octubre de 2019

Byron Idrovo

Byron Steven Idrovo Angumba

C.I: 0106626666



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Byron Steven Idrovo Angumba en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Caracterización de suelos expansivos de la ciudad de Cuenca", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 07 de octubre de 2019.

Byron Idrovo

Byron Steven Idrovo Angumba

C.I: 0106626666



AGRADECIMIENTOS

A Dios en primer lugar que ha sido fuente de fortaleza en el transcurso de la elaboración de este trabajo de titulación y durante toda la carrera.

A toda mi familia y amigos que han estado siempre pendientes de mi avance en esta linda carrera, en especial a mis padres, hermanos y abuelos.

De igual manera a la Ing. Karla Santacruz por la guía, ayuda y tiempo brindado para realizar este trabajo de investigación. A los lectores Ing. Jaime Bojorque y al Ing. Alfredo Vázquez por sus recomendaciones.

A todo el personal del laboratorio de Suelos y Geotecnia de la facultad de Ingeniería mediante el préstamo de equipos para la realización de los diferentes ensayos de este trabajo.

A las doctoras del laboratorio de Sanitaria de la facultad de Ingeniería que ayudaron con la elaboración de varias mezclas y proporción de agua destilada.



DEDICATORIA

A todas las personas que fueron parte de este camino, día a día, noche a noche, especialmente a mis papas, hermanos y abuelos.



1.INTRODUCCIÓN

La presencia de suelos expansivos durante la construcción principalmente de las cimentaciones, repercute en la estructura u obra civil. Esto se debe a que este tipo de suelos tiene la capacidad de expandirse en época de lluvia y contraerse en época seca. Por lo cual, este cambio volumétrico del suelo, genera daños sobre las cimentaciones y elementos estructurales sobre este tipo de suelos (Kalantari, 2012).

El desarrollo urbano de la ciudad de Cuenca cada vez invade nuevos terrenos, de donde no existe registro de edificaciones antiguas ni experiencia alguna con el tipo y comportamiento del suelo del lugar. Se vuelve entonces necesario colaborar en la identificación de ciertas zonas que puedan tener problemas al respecto de suelos expansivos.

La ciudad de Cuenca presenta zonas catalogadas de inestabilidad geológica, deslizamientos según el mapa de Información Digital de Elevaciones de la Alcaldía de Cuenca (Alcaldía de Cuenca, 2017), sin embargo el mapa no identifica suelos expansivos dentro de la ciudad.

Existe una gran cantidad de autores que relacionan el comportamiento expansivo de los suelos con diferentes propiedades o resultados de ensayos, mediante correlaciones Braja Das (2001), Sabtan (2005), Marín Nieto (1991), González de Vallejo (2002), Erguler y Ulusay (2003) se tienen entre otros. En este trabajo de titulación se contrastarán los resultados obtenidos de los ensayos de expansibilidad y se comparará con correlaciones de literatura, en procura de determinar una manera óptima de caracterizar suelos expansivos.

Las muestras de suelo seleccionadas se someterán a ensayos de expansibilidad para la obtención de valores característicos de expansión para su posterior comparación con los obtenidos mediante correlaciones. Los ensayos a realizar son: ensayo de Lambe, expansión libre, expansión controlada, límites de Atterberg y expansión libre en probeta. Además, de la realización de ensayos de caracterización con la finalidad de la obtención de parámetros tales como el porcentaje de finos, gruesos, arenas, en procura de la realización posterior de la clasificación del suelo. Los ensayos a realizar son: granulometría, hidrómetro y gravedad específica de la fase sólida.

Los resultados obtenidos en los diferentes estudios servirán de referencia, al momento de la construcción para realizar un buen diseño de la edificación y en caso de ser necesario la no construcción en estas zonas. Además, tomando en cuenta las consideraciones de construcción recomendadas en este documento según su potencial expansivo.



1.1 Justificación

La finalidad de la investigación propuesta es identificar suelos con problemas expansivos, de la ciudad de Cuenca, debido a que no se cuenta con estudios determinantes al respecto de la caracterización de suelos expansivos en la ciudad. La Municipalidad cuenta con delimitación de zonas con problemas por inestabilidad del terreno, sin embargo, no presenta ninguna caracterización ni determinación de suelos expansivos. Además, existen varios mecanismos para determinar el carácter expansivo de un suelo, es preciso entonces contrastar los diferentes mecanismos para establecer la metodología más adecuada y eficaz para caracterizar este tipo de materiales. Se pretende evaluar las características expansivas de estos suelos y comparar los resultados obtenidos con diferentes métodos de laboratorio; contrastarlos, además con información existente al respecto de algunos materiales expansivos ya analizados en previos trabajos.

Las zonas de estudio seleccionadas están en base a las delimitadas con inestabilidad geológica y deslizamientos en el Mapa IDE (Infraestructura de Datos Espaciales) de la alcaldía de Cuenca y de investigaciones realizadas en suelos catalogados con problemas de estabilidad por el Ingeniero Marco Tulio Erazo en su período de docencia en la Universidad de Cuenca. Sin embargo, se considera que es necesario ahondar en la forma en la que se caracteriza a los suelos expansivos o se determina su potencial expansivo, con el fin de generar una metodología clara y simple para determinar el grado de expansibilidad de un suelo.

Existen varios métodos para determinar y cuantificar el potencial expansivo de un suelo, muchos de estos métodos son indirectos y no necesariamente establecen la magnitud de expansión real del material, por lo que es necesario comparar los métodos existentes y analizar su utilidad y facilidad de ejecución.

1.2 Antecedentes

En la recopilación de estudios geológicos realizados por el ingeniero Erazo (2007) se detallan varias zonas con problemas geológicos de inestabilidad tales como: la vía al Valle durante su construcción, la zona de Sidcay con un deslizamiento afectando 16 Ha, los varves de Miraflores presentando problemas con edificaciones asentadas sobre ese sector. Además de la zona comprendida entre Gapal y Guzho identificándose los depósitos de ladera como expansivos. De todos únicamente se han reconocido estas zonas con problemas de inestabilidad, mas no se han dado rango de valores de expansibilidad de los mismos.

Después del desastre de la Josefina, nace el proyecto PRECUPA que se enfoca en detección de suelos inestables. El cual realiza el estudio distintivo de cada zona según sus hojas geológicas de los alrededores de la ciudad de Cuenca. Para cada



zona de estudio se indica la ubicación, zonas según su peligrosidad y recomendaciones de construcción. Sin embargo, no se registran valores característicos de expansión como porcentaje o presión.

Los primeros indicios de investigación sobre este tipo de problema relacionado a la expansibilidad de los suelos en la ciudad se lo realizó en el trabajo de titulación en el año de 2007 titulado “Determinación de presiones de expansión en arcillas expansivas en la ciudad de Cuenca” (Brito & Delgado, 2007) en el cual únicamente se abarcó las zonas de Baños y Challuabamba.

En años posteriores se realizó un trabajo similar pero únicamente abarcando la zona de Challuabamba denominado “Comprobación de las correlaciones de la presión de expansión con las propiedades índices en suelos del sector Challuabamba, Cuenca. Recomendaciones para la construcción de cimentaciones” (Vélez, 2012).

Un trabajo reciente es el estudio “Métodos para controlar el potencial expansivo en suelos arcillosos de la ciudad de Cuenca” (Bravo Heredia & Daza Orellana, 2019) utilizando muestras de Miraflores, Baños y Challuabamba. Mediante ensayos para determinar el potencial expansivo de estas muestras, se seleccionó el suelo más expansivo, siendo Miraflores al cual se realizó un proceso de estabilización.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

El objetivo general del trabajo de titulación es caracterizar suelos expansivos de la ciudad de Cuenca con la finalidad de catalogarlos y dar un valor de expansividad. Además de la comparación de los resultados de los ensayos de expansibilidad con correlaciones empíricas de la bibliografía existente. Generando a su vez información con la cual no se cuenta actualmente de las zonas en estudio.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Seleccionar muestras catalogadas como inestables y zonas que según su geología exista la posibilidad de localizar suelos expansivos en la ciudad de Cuenca.
2. Determinar propiedades físicas del suelo mediante ensayos de caracterización.
3. Determinar valores característicos de expansión mediante ensayos de expansividad.
4. Emplear correlaciones en función de diferentes parámetros para la obtención de valores de expansión.
5. Analizar y comparar los resultados obtenidos de ensayos de expansión y propiedades físicas para determinar valores cualitativos y cuantitativos con respecto al carácter expansivo del suelo.
6. Determinar ensayos o correlaciones recomendadas para la clasificación de un suelo expansivo.



1.4 Alcance

La presente investigación procura dar valores característicos de expansibilidad a las zonas seleccionadas que presentan problemas de inestabilidad geológica o deslizamiento dentro de la ciudad de Cuenca.

Los suelos seleccionados serán sometidos a ensayos tanto de caracterización y de expansividad para su posterior comprobación con correlaciones y realizar una validación de estas para suelos locales. Correlaciones que tienen la finalidad de reducir tiempo y costos en la ejecución de ensayos de laboratorio.

2. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se presenta conceptos de suelos expansivos y las zonas seleccionadas para la obtención de las muestras. Dentro de los conceptos de suelos expansivos tenemos: descripción, proceso de expansión, problemas relacionados, recomendaciones de construcción y utilidad de suelos expansivos. Para las zonas seleccionadas se da una breve descripción, basada fundamentalmente en los estudios realizados por Erazo (2007), además se incluye la ubicación, descripción de taludes y figuras de los sitios exactos de la extracción de las muestras.

2.1 Suelos expansivos

2.1.1 Descripción

Un suelo expansivo muestra cambios volumétricos según la presencia de agua en su masa. En la naturaleza, un suelo expansivo incrementa su volumen en temporada de lluvia y lo disminuye en sequía; esta fluctuación volumétrica genera problemas estructuras en las obras ubicadas sobre ellos (López Lara, 2014).

“Los suelos expansivos son un fenómeno que se presenta en un suelo arcilloso con mineral montmorillonita y en condiciones ambientales que dan pie a la reducción de humedad ya sea por evaporación o evapotranspiración de la vegetación” (Beltrán Martínez, 2009, p.4).

2.1.2 Proceso de expansión

El suelo presenta una estructura interna en forma de red cristalina, la cual posee cargas positivas y negativas que no se encuentran balanceadas. La partícula de arcilla posee forma de lámina, siendo las cargas positivas las cuales se ubican en los extremos con una pequeña presencia de cargas negativas, en las caras de la lámina se encuentran predominantemente cargas negativas. (Delgado Trujillo, 1986). Delgado (1986) plantea 3 mecanismos por los cuales la expansión está condicionada:

- a) Hidratación de las partículas de arcilla: la partícula con la finalidad de lograr un equilibrio interno de las cargas eléctricas tiende a atraer moléculas de agua formándose varias capas sucesivas. Estas capas de agua adsorbida generan un aumento de volumen de la partícula de arcilla y a su vez su expansión.
- b) Hidratación de cationes: el extremo positivo de la partícula de igual forma que en el caso anterior, atrae moléculas de agua con su extremo negativo con la finalidad de lograr el equilibrio interno eléctrico, formando varias capas, aumentando su volumen y generando expansión.

- c) Repulsión osmótica: se produce una migración de las moléculas de agua en el interior de dos capas de partículas, con el fin de igualar los cationes presentes, generando un hinchamiento.

En la Figura 1 se presenta la estructura mineralógica de los diferentes minerales de arcilla y como se encuentran estos predispuestos internamente.

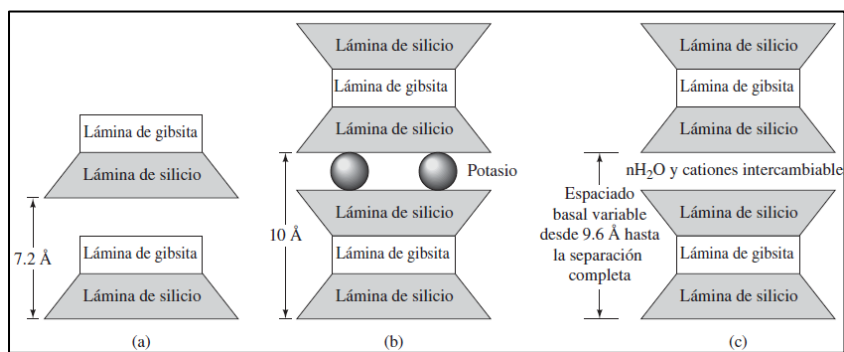


Figura 1. Estructura Mineralógica: (a) Caolinita, (b) Illita, (c) Montmorillonita (Braja M. Das, 2015).

2.1.3 Problemas relacionados

Los procesos de expansión en el suelo que se generan debido a la variación del contenido de humedad producen asentamientos diferenciales sobre la estructura, acompañados de una redistribución de esfuerzos en la cimentación (Vélez, 2012).

Varios problemas han sido relacionados a los fenómenos de la expansión especialmente a obras que están construidas sobre este tipo de suelos, pudiendo generar daños menores hasta la inhabilitación completa del uso de la misma. La mayoría de estos problemas se los puede identificar de manera sencilla con una inspección visual preliminar.

- Grietas y Roturas: en elementos estructurales, paredes, pisos, cimentaciones.
- Roturas: en tuberías de conducciones hidráulicas.
- Deformaciones: en los pavimentos asentados sobre suelos expansivos.
- Inestabilidad: de taludes, generando cierre de vías.

En la Figura 2 izquierda se presencia grietas en la capa de rodadura de la vía para el ingreso de varias urbanizaciones en el sector de Challuabamba. De igual manera en la misma Figura 2 derecha se observa un desprendimiento continuo de material del tipo rocoso sector Azogues. Las dos figuras pertenecen a sitios cercanos a la obtención de muestras.



Figura 2. Daños en zonas aledañas a las de extracción de muestras.

2.1.4 Recomendaciones de construcción

Las obras civiles se construyen sobre una extensa tipología de suelos, por lo cual el ingeniero debe estar en la capacidad de tomar decisiones al momento de encontrarse con suelos expansivos. Montejo Fonseca (2002) indica unas posibles soluciones para este tipo de problemas:

- Utilizar el material del sitio, considerando los diseños de la obra a ser construida.
- Sustitución del material.
- Modificación de las propiedades del material en sitio.

En el estudio desarrollado de comprobación de las correlaciones de la presión de expansión con las propiedades índices en suelos del sector Challuabamba, Cuenca, recomendaciones para la construcción de cimentaciones Vélez (2012) se plantea modificar la estructura y el sistema de cimentación como una opción y en el otro caso tomar acciones directamente en el suelo.

Para la acción sobre la estructura y sistema de cimentación se tienen las siguientes opciones además de su grado de aplicabilidad presentados en la Tabla 1:

Acción sobre la estructura y sistema de cimentación	Bajo	Me-dio	Alto	Muy Alto
Cimentaciones superficiales en suelos expansivos	X			
Zapatas corridas	X	X		
Zapatas aisladas		X	X	
Losas de cimentación				X

Tabla 1. Recomendaciones de construcción sobre la estructura y sistema de cimentación (Vélez, 2012).

De igual forma para las acciones directas sobre el suelo que se presentan en la Tabla 2:

Acción directa sobre el suelo	Bajo	Me- dio	Alto	Muy Alto
Reducción de la densidad del suelo	X	X		
Modificación de propiedades expansivas del suelo	X	X		
Sustitución del suelo expansivo			X	X
Pre- humectación del suelo				X
Aislamiento del suelo de las variaciones de humedad	X	X	X	X

Tabla 2. Recomendaciones de construcción con acción directa sobre el suelo (Vélez, 2012).

2.1.5 Ventajas

Dentro de un relleno sanitario es factible el uso de suelos expansivos, debido a las siguientes condiciones establecidas en (Brito & Delgado, 2007):

1. Impermeabilización evitando el paso del agua y de los lixiviados.
2. El lixiviado al pasar el tiempo en contacto con la arcilla mejora a esta sus propiedades de impermeabilización.
3. Iones del lixiviado son absorbidos por los minerales de la arcilla.

Sin embargo, para que el suelo arcilloso sea apto para ser utilizado en un relleno sanitario como se presenta en la Figura 3, debe cumplir con las siguientes propiedades, según (Brito & Delgado, 2007) :

- Límite líquido menor que 90%
- Índice plástico entre 12 y 65%
- Contenido de arcilla mayor al 35%
- Contenido de grava menor que el 30%
- Tamaño máximo de las partículas igual a 25 mm

Además, la utilización de la bentonita que tiene en gran proporción minerales de arcilla Montmorilonita, siendo este mineral el que más problemas presentan referente a suelos expansivos. Pero es esta propiedad que la hace muy útil al momento de la estabilización de las paredes en perforaciones a grandes profundidades según Hidalgo, Senese, Cano, & Sarquis (2016). Además de esta propiedad cumple las siguientes funciones durante la perforación:

- Enfriamiento de la herramienta de perforación.
- Formación de un recubrimiento impermeable que no deja filtrar agua.
- Permitir la adición de agentes densificantes.
- Remoción de escombros del fondo del pozo y transporte de los mismos a la superficie.
- Transmisión de potencia hidráulica a la broca.

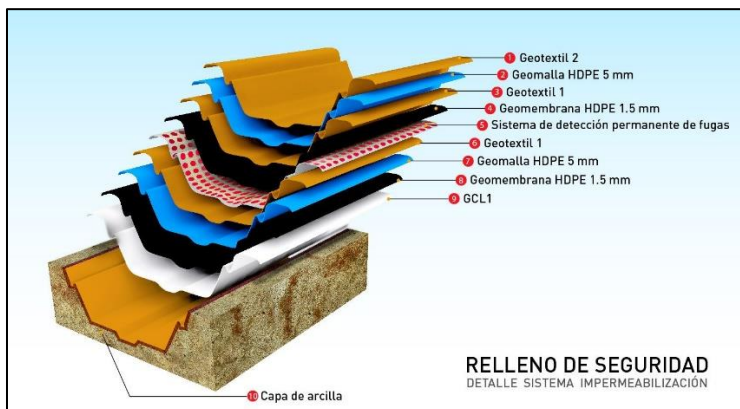


Figura 3. Empleo de la arcilla en rellenos sanitarios (Ciclo Chile, 2019).

2.2 Zonas de estudio

Las zonas de estudio seleccionadas están en base al mapa del geoportal de zonas colapsables de la alcaldía de la ciudad de Cuenca (Alcaldía de Cuenca, 2017) Figura 4 y de investigaciones realizadas en suelos catalogados con problemas de estabilidad por el Ingeniero Marco Tulio Erazo en su libro de recopilación de estudios geológicos, elaborado durante su periodo de docencia en la Universidad de Cuenca (Erazo, 2007).

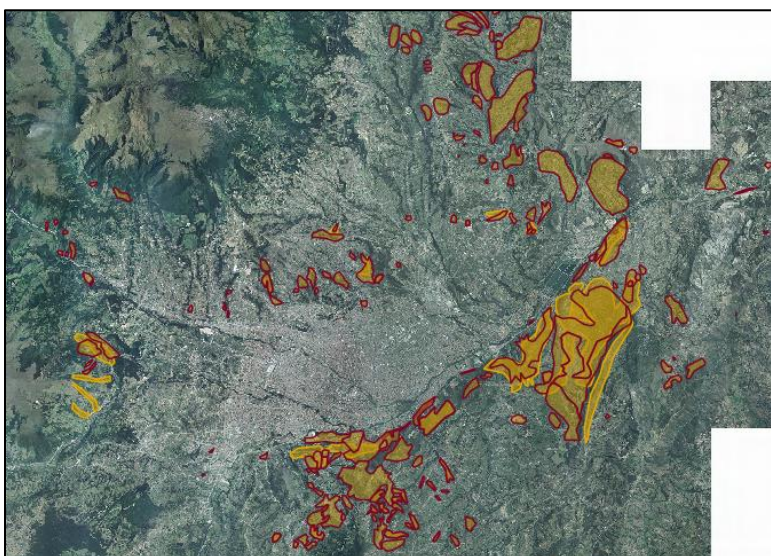


Figura 4. Mapa IDE Cuenca (Alcaldía de Cuenca, 2017).

Luego de analizar las dos fuentes principales mencionadas, las zonas categorizadas como inestables en ambos estudios, se seleccionaron como posibles sitios de muestreo y estudio para el presente trabajo. Debido a la gran extensión de estas áreas se procedió a realizar una inspección preliminar de las zonas, con la finalidad de obtener muestras que sea representativas del lugar y a su vez descartar material de tipo granular que no presenten resultados de expansibilidad. Para la selección se consideró que exista una gran continuidad en extensión del material potencialmente expansivo. Se consideró además la potencia del mismo, lo cual se pudo presenciar en cortes realizados a lo largo de trayectos en las vías. Además, se tomó en cuenta si existen problemas de asentamientos, cuarteos, deslizamientos dentro o cerca de la zona de estudio, mediante la entrevista a personas del lugar y corroborando mediante una inspección visual. Siendo las zonas de estudio seleccionadas para la obtención de las muestras, las presentadas a continuación:

2.2.1 GAPAL

La zona de Gapal mencionado varias veces en los estudios del Ingeniero Erazo (2007), en específico el estudio de zonas de derrumbes y depósitos coluviales, representando por los depósitos de pie de Gapal que presentan expansividad. En la Figura 5 se aprecia el talud de la extracción del material. La muestra se obtuvo del tipo fino, color gris, tamaño de grano pequeño uniforme, textura tipo harinosa.

Coordenadas Geográficas

- Latitud: $-2^{\circ} 55' 21''$
- Longitud: $-78^{\circ} 59' 43''$

Descripción:

- Potencia 15 m.
- Continuidad 20 m en la base y 10 m en la parte superior.
- Buzamiento 80° a 90° .



Figura 5. Talud de extracción del material en el sector de Gapal.

2.2.2 CHILCAPAMBA

Durante la construcción de la vía al Valle se desestabilizaron varios taludes, generando fluencia de material, deslizamientos, y hundimiento de la estructura vial, según Erazo (2007) la causa para estas inestabilidades fue debido a la presencia de lluvias.

La Figura 6 muestra el talud del cual se obtuvo la muestra y que está conformado por el material inestable mencionado anteriormente. El material que se obtuvo fue del tipo fino, color amarillento, tamaño de grano pequeño uniforme, textura tipo polvorosa.

Coordenadas geográficas:

- Latitud: $-2^{\circ} 55' 22''$
- Longitud: $-78^{\circ} 58' 42''$

Descripción:

- Potencia 10 m.
- Continuidad 60 m.
- Buzamiento 80° a 90° .



Figura 6. Talud de extracción del material en el sector de Chilcapamba.

2.2.3 CHALLUABAMBA

Existen estudios preliminares por el ingeniero Vélez (2012) donde se detalla la existencia de problemas en la construcción de viviendas y se da recomendaciones de construcción en este tipo de suelo en su trabajo titulado “Comprobación de las correlaciones de la presión de expansión con las propiedades índices en suelos del sector Challuabamba, Cuenca, recomendaciones para la construcción de cimentaciones”. En la Figura 7 se aprecia el lugar de extracción de la muestra. Se obtuvo una muestra de tipo bloque, tamaño pequeño alrededor 10 cm, color amarillento, textura tipo plastilina.

Coordenadas geográficas:

- Latitud: $-2^{\circ} 51' 30''$
- Longitud: $-78^{\circ} 55' 13''$



Figura 7. Sitio del lugar de extracción urbanización colinas de Challuabamba.

2.2.4 SIDCAY

En la inspección visual de la zona de Sidcay se presentó problemas de deformaciones en la calzada de la vía. En la Figura 8 se presenta el talud de extracción de la muestra donde se obtuvo una muestra del tipo fino, color café gris, tamaño de grano uniforme, textura polvorienta.

Coordenadas geográficas:

- Latitud: $-2^{\circ} 51' 28''$
- Longitud: $-78 56' 16''$

Descripción:

- Potencia 60 m.
- Continuidad 100 m.
- Buzamiento 80° a 90° .



Figura 8. Talud de extracción del material sector Sidcay.

2.2.5 MIRAFLORES

La zona de Miraflores está asentada sobre la formación de varves, la cual se encuentra estratificada en capas alternadas de limos y arcillas. Erazo (2007) indica que no se presentan problemas de excavación del suelo si se encuentra seco, caso contrario si esta se encuentra en contacto con el agua, sufriendo problemas de expansibilidad. En la figura 9 se presenta el sitio de extracción. La muestra se obtuvo del tipo fino, color crema, tamaño de grano uniforme, textura tipo plastilina.

Coordenadas geográficas:

- Latitud: -2 52' 48"
- Longitud: -78 59' 47"

Descripción

- Potencia 5 m.
- Continuidad 40 m.
- Buzamiento 90°.



Figura 9. Talud de extracción del material sector Miraflores.

2.2.6 AZOGUES

En la recopilación de estudios geológicos realizados por el ingeniero Erazo (2007), indica la presencia de bentonitas en la zona de Charasol próximo a Azogues los cuales según su mineralogía deberían presentar propiedades de expansibilidad, por este motivo este suelo ha sido incorporado en el presente estudio. Se espera poder generar una comparación del comportamiento de este suelo con las muestras de suelo anteriormente seleccionadas.

Se encontró la ubicación de este material mediante la carta geológica de Azogues. Durante la visita al sector, se pudo constatar inestabilidad del material, según muestra la Figura 10, el material del talud sufre desprendimientos continuos de bloques fuertemente consolidados de material fino, color gris oscuro, textura lisa.



Coordenadas geográficas:

- Latitud: $-2^{\circ} 44' 46.5''$
- Longitud: $-78^{\circ} 51' 6''$

Descripción:

- Potencia 30 m.
- Continuidad 60 m.
- Buzamiento 90° .



Figura 10. *Talud de extracción del material.*

3. METODOLOGÍA

Con el propósito de caracterizar y determinar el carácter expansivo de los suelos en estudio, se divide la metodología en estos dos aspectos de análisis: elaboración de ensayos de caracterización del material y el segundo, de expansibilidad. A continuación, se incluye una breve descripción del ensayo, su cálculo y la normativa empleada para cada ensayo dentro de cada metodología, las cuales se detallan a continuación.

3.1 Caracterización

La caracterización del material consiste en determinar con qué tipo de suelo se está trabajando, para caracterizar el mismo se requiere determinar su granulometría, límites de Atterberg y propiedades físicas. Para determinar la granulometría del suelo, se requiere separar el mismo según su rango de tamaño de grano, se utiliza una granulometría por vía seca para partículas mayores a 0.075mm, para tamaños menores se debe usar el método de sedimentación a través del hidrómetro.

Con los porcentajes obtenidos en estos ensayos y los resultados de los límites de Atterberg, se puede realizar la clasificación del material mediante el método de la SUCS o AASHTO, para conocer con qué tipo de suelo se está trabajando y correlacionar con los posibles resultados que se puede obtener en los ensayos de expansibilidad.

3.1.1 Granulometría

Para la realización de este ensayo se utiliza la norma ecuatoriana **NTE INEN 0696 Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, finos y gruesos** la cual concuerda a su vez con la norma **ASTM C136 y la AASHTO T 27**.

Proceso:

- Se utiliza una muestra de suelo desintegrado previamente.
- Se pesa una muestra de 500 gramos para todos los ensayos y se procede a lavar sobre el tamiz 200.
- Se seca la muestra al horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas.
- Se procede a realizar el tamizado a través de la serie de tamices finos descritos en la Tabla 3, durante 3 minutos.
- Se pesa el material retenido en cada tamiz y se procede a realizar la curva granulométrica.



Tamiz	Abertura (mm)
N.4	4,75
N.8	2,38
N.16	1,31
N.30	0,64
N.50	0,38
N.100	0,15
N.200	0,07

Tabla 3. *Tamices y abertura serie fina.*

3.1.2 Hidrómetro

En el ensayo se utiliza la norma **ASTM D422 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils** la cual coincide con la norma **AASHTO T 88**.

Proceso:

- Una muestra de 50 g pasados por el tamiz 200 es empleada para este ensayo.
- Se utiliza 125 ml de una solución al 4% de hexametáfosfato de sodio como defloculante para evitar este fenómeno y que no interfiera en los resultados del ensayo.
- Se deja reposar la solución con el suelo durante 8 a 12 horas, luego de este tiempo se mezcla por 2 minutos.
- Se pasa la mezcla de suelo y defloculante a una probeta graduada de 1000 ml, se llena con agua destilada hasta completar los 1000 ml.
- Se procede a agitar la muestra y se toma mediciones con el hidrómetro a los 0.25, 0.5, 1, 2 min. Después de este tiempo se sitúa el hidrómetro en otra probeta graduada de 1000 ml llena únicamente con agua destilada y se toma mediciones a los 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480, 1440 minutos.

Corrección por menisco, es la diferencia que existe entre la lectura superior e inferior del hidrómetro. Las mediciones siempre se realizan por el menisco superior por facilidad, pero para los cálculos se debe utilizar el menisco inferior.

Corrección por defloculante, en una probeta de 1000 ml se procede a llenar con 125 ml de solución y se la completa con agua destilada, se obtiene la diferencia de densidad por defloculante, comparando su medida con agua solamente.

Corrección por temperatura, luego de realizar las mediciones en la muestra de solución se mide la temperatura en otra probeta con la misma mezcla sin la incorporación del suelo. La temperatura sugerida para este ensayo es de 20° C, siendo esta la utilizada para esta corrección.

El resultado del ensayo es una gráfica del porcentaje de suelo en suspensión vs el diámetro de la partícula para lo cual se tienen las siguientes ecuaciones:



$$P = \left(\frac{100000}{W} * \frac{G}{G - G_1} \right) * (R - G_1) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

- P= Porcentaje de suelo en suspensión (%)
- R= Lectura del hidrómetro corregido
- W= Masa total de suelo seco (g)
- G= Gravedad específica del suelo (g/cm³)
- G₁= Gravedad específica del líquido (g/cm³)

$$D = \sqrt{\left(\frac{30 * \eta}{980 * (G - 1)} \right) * \frac{L}{T}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

- D=Diámetro de la partícula (mm)
- η =Viscosidad del agua a la temperatura indicada (poises)
- L=Distancia desde la superficie al centro de gravedad del hidrómetro (cm)
- T=Tiempo acumulado desde el inicio de la sedimentación (min)
- G=Gravedad específica del suelo

3.1.3 Clasificación de Suelo

Mediante la clasificación del suelo se puede inferir las características que puede tener el material, los resultados obtenidos pueden alertar sobre un posible comportamiento expansivo, allí radica la importancia de clasificar el suelo en el presente caso de estudio.

Para la clasificación del suelo existen dos diferentes metodologías aceptadas las cuales son de la AASHTO y del Sistema Unificado de suelos (SUCS) las cuales se proceden a detallar.

3.1.3.1 AASHTO

De acuerdo con este sistema el suelo se clasifica en siete grupos principales: de A-1 a A-7. Los tres primeros grupos (1 a 3) son del tipo granular, los cuatro demás grupos (4 a 7) del tipo fino limos y arcillas.

Además, el método considera diferentes tipos de material según el tamaño de partícula según lo siguiente: El material que pasa el tamiz de 75 mm y es retenido por el núm. 10 se denomina grava, el material que pasa el núm. 10 y se retiene en el núm. 200 es arena y lo que pasa este último tamiz son limos y arcillas indistintamente.



Los datos necesarios para la clasificación por el método de la ASSHTO son: la distribución granulométrica, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. En el Anexo 1 se presenta las tablas que se siguen para la clasificación.

Un factor para determinar si un material es bueno para material de subrasante es mediante el índice de grupo. El cual tiene un resultado inverso, a menor valor mejor es la calidad del suelo para material de subrasante. La ecuación para el cálculo es la siguiente:

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(IP - 10) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

- F = Porcentaje pasado por el tamiz N 200 (%)
- LL = Límite líquido (%)
- IP = Índice de plasticidad (%)

3.1.3.2 SUCS

Sistema propuesto por Casagrande en 1948 en el cual se clasifica el suelo con dos letras. La primera indica el tipo de suelo: grava (G), arena (S), arcilla (C), limo (M) y el segundo indica si es bien (W) o mal (P) graduada en el caso de que el suelo sea mayormente grueso; caso contrario se usan las características de baja (L) o alta (H) plasticidad para suelos de grano fino. En el Anexo 2 se presentan las tablas para su clasificación. Según estas tablas la información que se requiere para la clasificación por el método de la SUCS es:

- Porcentaje de grava: la fracción que pasa el tamiz de 76.2 mm y es retenida en el tamiz núm. 4.
- Porcentaje de arena: la fracción que pasa el tamiz núm. 4 y es retenida en el tamiz núm. 200.
- Porcentaje de limo y arcilla: la fracción más fina que el tamiz núm. 200.
- El límite líquido y el índice de plasticidad.

3.1.4 Gravedad específica de la fase sólida.

En el ensayo se utiliza la norma **ASTM D854 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soils Solids by Water Pycnometer**.

Proceso:

- Se toma una muestra de 50 g pasada por el tamiz 4.
- Se coloca el suelo en el picnómetro.
- Se procede a llenar con agua aproximadamente los 2/3 y a mezclar hasta obtener una solución homogénea.



- Se coloca el picnómetro en baño maría durante 10 minutos y se procede a ir llenando el picnómetro hasta la marca de aforo.
- La espuma que se genere al ir retirando el oxígeno atrapado se debe retirar del picnómetro.
- Retirar el picnómetro del baño maría y realizar anotaciones del peso del picnómetro con el suelo de 50 a 20 grados centígrados.
- Se debe realizar una calibración previa del picnómetro únicamente con agua para la obtención de la curva de calibración.

Cálculos:

$$G_s = \frac{K W_s}{W_{ma} + W_s - W_{mas}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

- G_s = Gravedad específica de la fase sólida
- K = Coeficiente de relación de densidad del agua del ensayo con la densidad del agua a 20° C.
- W_s = Peso suelo seco (g)
- W_{ma} = Peso matraz + agua (g)
- W_{mas} = Peso matraz + agua + suelo (g)

3.2 Expansividad

Los suelos expansivos son suelos arcillosos inestables en presencia de humedad, ya que su característica principal es experimentar cambios de volumen cuando varía su contenido de agua. En caso de que hubiera una edificación sobre esta zona con este tipo de suelos tendería a fracturarse produciendo grietas en las paredes o bien que la cimentación cediera y que toda la edificación colapsará.

Para determinar el carácter expansivo de un suelo fino, suele utilizarse los límites de Atterberg del material y correlacionarlos con métodos empíricos, con ello se establece su grado de expansión; otro mecanismo sería utilizar ensayos de laboratorio para medir directamente sus características expansivas. Dentro del presente trabajo se utilizaron ambos mecanismos, a continuación, se detalla el proceso seguido para cada uno.

3.2.1 Límites de Atterberg

Cuando los minerales de arcilla están presentes en el suelo de grano fino, el suelo se puede moldear a medida que se incrementa humedad sin que se desmorone. Esta naturaleza cohesiva se debe al agua adsorbida que rodea a las partículas de arcilla. Según Braja M Das (2015), un suelo plástico puede cambiar desde una consistencia de un sólido quebradizo, cuando existe baja cantidad de agua en su masa, hasta llegar a presentar características de un fluido, cuando su contenido de humedad es alto. Este cambio en consistencia fue lo que, en 1900 Albert Mauritz



Atterberg desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con diferentes contenidos de humedad obteniendo los siguientes límites.

3.2.1.1 Límite Líquido

Para la realización de este ensayo se emplea la norma ecuatoriana **NTE INEN 0691 Determinación del límite líquido. Método de Casagrande**, equivalente a la norma **ASTM D 4318 y la AASHTO T 89**.

Proceso:

- Para el ensayo se utiliza material pasante por el tamiz 40, al cual se procede a añadir agua hasta conseguir una consistencia de plastilina.
- La muestra de suelo se la procede a ubicar en la cuchara de Casagrande.
- Se la ranura y se procede a dar un número de golpes, el cual debe estar entre 15 a 30.
- Se toma 4 muestras en este rango para sacar la humedad.
- Finalmente se procede a generar una gráfica, en donde se relaciona, la humedad en escala logarítmica y el número de golpes. Donde se tenga 25 golpes es la humedad del límite líquido.

Además, para la obtención de este límite líquido se realizó el ensayo de penetración de cono utilizando la norma **BS 1377**.

Proceso:

- Para el ensayo se utiliza de igual forma material pasante por el tamiz 40, se le agrega agua hasta obtener consistencia de plastilina.
- Se ubica el material en el molde cilíndrico y se procede a realizar el ensayo con el aparato de penetración. El cono debe penetrar en el centro de la masa de suelo durante 5 segundos, se registra el dato de penetración en mm.
- Se obtienen 4 muestras con penetración desde los 15 hasta los 25 mm y se obtiene la humedad.
- La humedad de penetración a los 20 mm en la gráfica de humedad en escala semilogarítmica vs penetración es la que pertenece al límite líquido.

3.2.1.2 Límite Plástico

La norma empleada es la norma ecuatoriana **NTE INEN 0692 Determinación del límite plástico**, equivalente a la norma **AASHTO T-90 y a la ASTM D 4318**.

Proceso:

- Se utiliza material pasante del tamiz 40 con la adición de agua.
- Se hacen rollos en una placa de vidrio de 3 mm de espesor hasta que estos se empiecen a agrietar.
- Se procede a sacar su humedad.



3.2.1.3 Límite de Contracción

Se emplea la norma **ASTM D427 Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method.**

Proceso:

- Para este ensayo se utiliza el material que dé como resultado 25 golpes en la cuchara de Casagrande
- Se la procede a ubicar en un recipiente de contracción previamente engrasado, el suelo se coloca en 3 capas, dando golpes por cada capa al recipiente con la finalidad de eliminar el aire atrapado.
- Se procede a secar la muestra en el horno por 24 horas.
- El recipiente de contracción debe estar previamente calibrado con mercurio.

Cálculos:

$$LC = \omega - \frac{(V_h - V_s) * \rho_w}{W_s} * 100 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

- LC=Límite de contracción (%)
- ω = Humedad (%)
- V_h =Volumen de la muestra húmeda (cm³)
- V_s =Volumen de la muestra seca (cm³)
- W_s =Peso seco del suelo (g)
- ρ_w =Densidad del agua (g/cm³)

3.2.2 Expansión Libre

Se talla en laboratorio el material para ubicarlo seguidamente en el consolidómetro. Para este ensayo se empleó la norma **ASTM 4829 Standard Test Method for Expansion Index of Soils.**

Proceso:

- Se pesa la muestra con el suelo inalterado más el anillo.
- Colocar la muestra de suelo en la cámara de consolidación, teniendo presente que las piedras porosas se encuentren ubicadas correctamente.
- Se pesa únicamente el anillo y se registran las dimensiones: altura y el diámetro del mismo.
- Colocar la cámara de consolidación en el consolidómetro, verificando que el brazo en donde se colocan los pesos se encuentre perfectamente horizontal.
- Agregar agua hasta que rebose sobre la piedra porosa superior y mantener esta piedra saturada durante todo el ensayo.
- Encerar el dial y esperar hasta que empiece a marcar.



- Hacer la lectura del deformímetro y tiempo.
- Se da como finalizado el ensayo cuando el deformímetro no varía más de ± 0.01 (1 raya) en 6 horas.
- Tomar muestras del suelo para hallar su humedad.
- Se realiza una gráfica de resultados de deformación vs tiempo.

Cálculos:

$$\% \Delta V = \frac{\Delta L}{L} * 100\% \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

- ΔV = Variación volumétrica (%)
- ΔL = Deformación (mm)
- L = Altura inicial (mm)

$$V_f = L * A + \Delta V \quad (\text{Ecuación 7})$$

- V_f = Volumen Final (cm^3)
- A = Área (cm^2)

$$\gamma = \frac{Wh}{V} \quad (\text{Ecuación 8})$$

- γ = Densidad Húmeda (g/cm^3)
- Wh = Peso húmedo (g)
- V = Volumen (cm^3)

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega} \quad (\text{Ecuación 9})$$

- γ_d = Densidad seca (g/cm^3)

$$e = \frac{V - \frac{Ws}{Ss}}{\frac{Ws}{Ss}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

- e = Espacios vacíos (%)
- Ss = Gravedad específica de la fase sólida (g/cm^3)
- Ws = Peso seco (g)

$$S = \omega * \frac{Ss}{e} \quad (\text{Ecuación 11})$$

- S = Saturación (%)



3.2.3 Expansión Controlada

Para este ensayo se empleó la norma **ASTM 4829 Standard Test Method for Expansion Index of Soils.**

Proceso:

En este ensayo se repite los 6 primeros pasos del ensayo de expansión libre con la adición de los siguientes:

- Conforme el deformímetro vaya incrementando sus lecturas se tendrá que ir colocando diferentes pesos para estabilizarlo, caso contrario si el deformímetro disminuye las lecturas se tendrá que retirar peso. El dial se debe encontrar en un rango entre $-0.03 \leq \delta \leq 0.03$ (mm) sin superar estos valores.
- Hacer la lectura del deformímetro, tiempo y la carga que se encuentra aplicada en ese instante.
- Se da como finalizado el ensayo cuando el deformímetro no varía más de ± 0.01 en 6 horas.
- Tomar muestras del suelo para hallar la humedad.
- Se realiza una gráfica de resultados de esfuerzos vs tiempo.

Cálculos:

Se utilizan las mismas formuladas citadas en el ensayo de Expansión Libre.

3.2.4 Expansión Libre en probeta

Para este ensayo se utilizó la norma **IS2720 Determination Of Free Swell Index Of Soils.**

Proceso:

- Se utiliza material pasante por el tamiz 40 secado en el horno en una cantidad de 10 g, se preparan dos muestras.
- Se ubica el material en dos probetas de 100 ml cada una.
- Se completa el volumen de la una probeta con agua destilada y la otra con agua destilada.
- Se realiza la medición del volumen final.

Cálculos:

$$e = \frac{V_d - V_k}{V_k} * 100 \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

- e = Expansión (%)
- V_d = Volumen final de agua destilada (cm^3)
- V_k = Volumen final de agua con keroseno (cm^3)

Para la clasificación de la muestra según el ensayo de expansión libre en probeta se utiliza la Tabla 4.

Expansión %	Potencial de Expansión
0 – 20	Muy Bajo
21 – 50	Bajo
51 – 90	Medio
91 – 130	Alto
> 130	Muy Alto

Tabla 4. Clasificación para expansión libre en probeta (ASTM D 4829).

3.2.5 Lambe

Se emplea para este ensayo la norma colombiana **I.N.V. E – 120 – 07 Determinación del potencial de expansividad de un suelo en el aparato de Lambe**, debido a que no existe una normativa internacional al respecto, además en la normativa ecuatoriana, no figura este tipo de ensayo.

Proceso:

- La muestra se procede a secar al ambiente para ser desmenuzada.
- Se obtiene dos muestras con un peso total de 1 kg.
- Una de ellas se tamiza por el tamiz 10 y el material pasante se utiliza.
- El material se puede preparar con tres diferentes tipos de humedad. El seleccionado es la humedad del límite plástico, debido a la facilidad de preparación de la muestra.

Humedad	No. De Capas	No. de golpes por capa	Energía por unidad de volumen
Límite Plástico	1	5	Proctor normal
Húmedo (100%)	3	4	½ Proctor modificado
Seco (50%)	3	7	Proctor modificado

Tabla 5. Parámetros de preparación previa de la muestra al ensayo (UNICAUCA, 2007).

La preparación de la muestra se realiza en 1 capa con 5 golpes del martillo Proctor normal, datos obtenidos de la Tabla 5.

- Se coloca el suelo dentro de los anillos colocados unos sobre otro y se presiona con la masa uniformemente por toda su superficie hasta que ésta quede plana y unos 3 mm por debajo de la cara superior del anillo guía.



- Se dan, seguidamente, cinco golpes del martillo Proctor normal repartidos por dicha superficie, cambiando la posición de la masa después de cada golpe.
- Al finalizar la compactación, la superficie de la probeta debe quedar entre 3 mm y 6 mm por encima del plano de separación de los dos anillos.
- Se enrasa el material y se eliminan los restos de suelo que hayan podido quedar en la base, si la compactación se ha efectuado directamente sobre ésta.
- Se procede a ubicar la muestra en el aparato de Lambe.
- Se coloca la carga de fijación, se ajusta el vástago del anillo sobre la superficie del pistón de carga hasta que se consiga una lectura del medidor de deformaciones equivalente a 40 N (4.1 kgf).
- Se anota el tiempo y se añade agua, llenando la célula hasta que el nivel de aquélla sobrepase ligeramente la cara superior del anillo guía.

Se toman lecturas del anillo dinamométrico a medida que el suelo se hincha, a diferentes tiempos, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30, 60, 90 y 120 minutos. Transcurridas 2 horas, se toma el valor de la lectura del anillo dinamométrico y se calcula el valor de la fuerza correspondiente en Newtons.

Cálculo:

Índice de hinchamiento.

$$IH = \frac{F}{A} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

- IH= Índice de hinchamiento (N/mm²)
- F= Fuerza registrada (N)
- A=Área de la muestra (mm²)

Se ingresa en la Figura 11 con el índice de hinchamiento y el contenido de humedad y se obtiene el valor de cambio de volumen potencial.

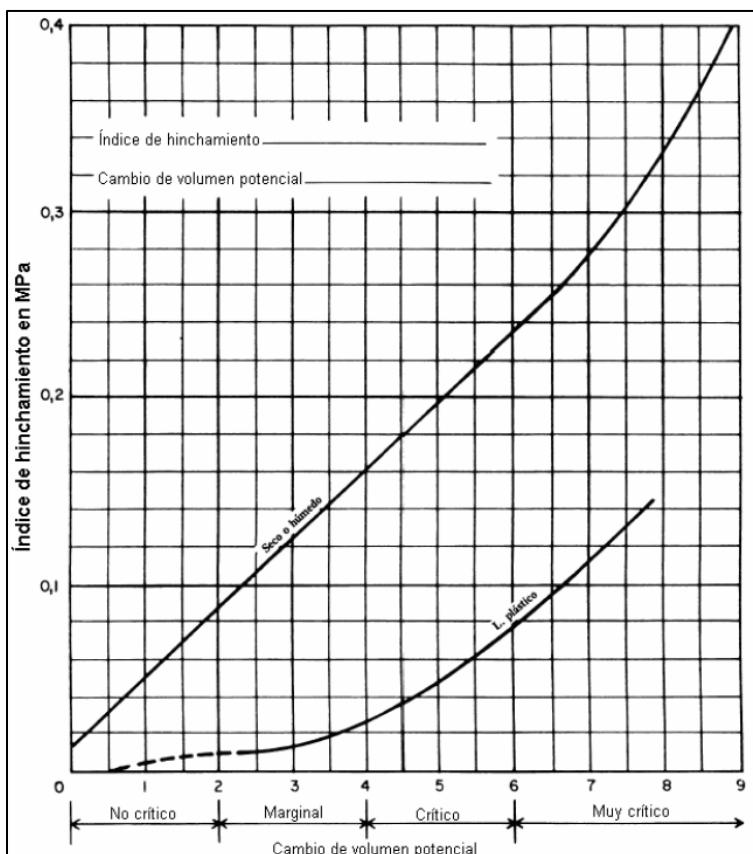


Figura 11. Índice de hinchamiento vs. Cambio de volumen de potencia (UNICAUCA, 2007).

3.3 Correlaciones

Las correlaciones permiten relacionar las diferentes propiedades que tiene el suelo, con valores característicos de expansibilidad. Vélez (2012) separa el estudio de las correlaciones en tres grupos:

- Las que determinan el tipo del mineral predominante en la arcilla.
- Las que cualitativamente dan el grado de expansividad, que puede ser: bajo, medio, alto, muy alto.
- Las que cuantifican el porcentaje de expansión y la presión de expansión, en base a correlaciones empíricas

3.3.1 Tipo de mineral predominante

Se emplearon 4 correlaciones para la clasificación de las muestras según el tipo de mineral predominante: Braja Das (2001), Skempton (1953), Seed, Woodward and Lungren (1964) y Marín Nieto (1991). Las tres primeras correlaciones establecen tablas para su clasificación y Marín Nieto emplea un método gráfico. Se proceden a describir estas 4 correlaciones a continuación.

Braja Das (2001) estableció diferentes minerales en un rango determinado según el valor de la gravedad específica de la fase sólida, en el cual las arcillas se encuentran entre 2.6 a 2.9 como se presentan en la Tabla 6.

Mineral	Gravedad Específica, Gs
Cuarzo	2.65
Caolinita	2.6
Ilita	2.8
Montmorilonita	2.65-2.80
Haloisita	2.0-2.55
Feldespatos de potasio	2.57
Feldespatos de sodio y calcio	2.62
Clorita	2.6-2.9
Biotita	2.8-3.2
Muscovita	2.76-3.1
Hornblenda	3.0-3.47
Limonita	3.6-4.0
Olivino	3.27-3.37

Tabla 6. Gravedad específica de los minerales más importantes (Braja DAS, 2001).

Skempton (1953) estableció un parámetro llamado actividad, el cual se encuentra en función de la relación del índice de plasticidad y el porcentaje de arcilla menor a 0.002 mm (Vélez, 2012). En la Tabla 7 se presenta los diferentes tipos de minerales según su actividad.

$$Actividad = \frac{Ip}{\% < 0.002} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Mineral	Actividad, A
Esmectitas	1 – 7
Ilita	0.5 – 1
Caolinita	0.5
Haloisita	0.5
Holoisita	0.1
Atapulgita	0.5 – 1.2
Alofano	0.5 – 1.2

Tabla 7. Actividad de los minerales de arcilla (Skempton, 1953).

Seed, Woodward and Lungren (1964) relación similar a la de Skempton con la variación de que, si el porcentaje de material que pasa 0,002 mm es mayor que el 40%, la línea pasa por el origen y cumple la expresión propuesta por Skempton. Si es menor que el 40%, la expresión es la propuesta por Seed.

$$Actividad = \frac{Ip}{(\% < 0.002 - 10)} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Marín Nieto (1991) propuso el método del gradiente mineral para determinar el mineral de arcilla predominante de un suelo. En la Figura 12 se muestra los diferentes grupos de los minerales de arcilla. En el cual se ingresa en las abscisas con el valor del límite líquido dividido para el índice de plasticidad y las ordenadas con el índice de plasticidad.

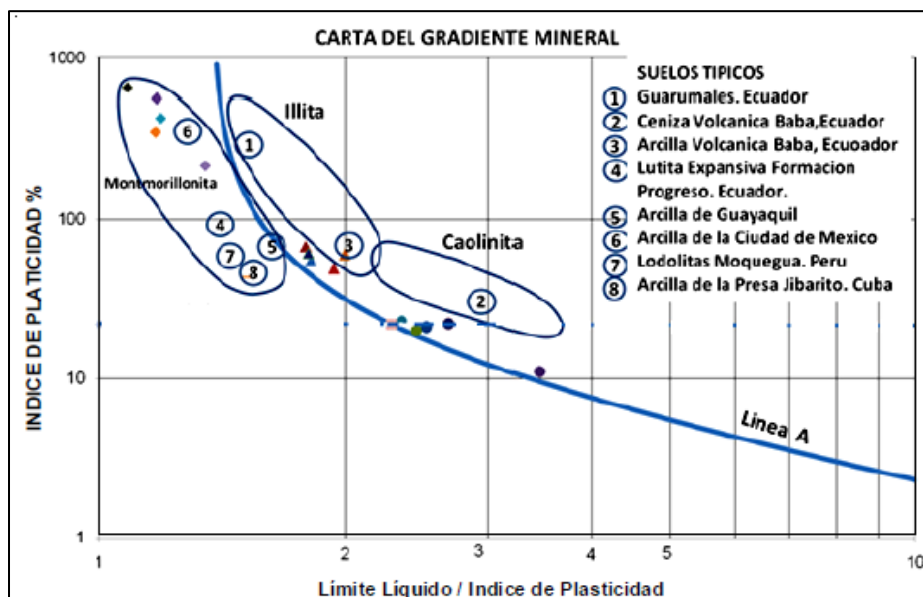


Figura 12. Gradiente mineral (Marín Nieto, 1991).

3.3.2 Grado de expansividad

Para la clasificación según el grado de expansividad se emplearán dos grupos de correlaciones, la primera sin tomar en cuenta parámetros obtenidos en resultados de expansividad siendo 5 las que intervienen: 2 de Holtz y Gibbs (1954), Holtz y Gibbs (1956), Holtz, Dakshanamurthy y Raman (1973) y Seed (1962). Para las cuales se establecen tablas para su clasificación, excepto Seed (1962) que emplea un método gráfico.

El segundo grupo incluye parámetros obtenidos en ensayo de expansión tales como presión, porcentaje de expansión y presión de expansión de Lambe. Las correlaciones que están dentro de este grupo son las propuestas por Ortiz (1975), González de Vallejo (2002) y Chen (1988). Se proceden a describir las correlaciones empleadas de los dos grupos a continuación.

Holtz y Gibbs (1954) realizaron una primera clasificación del grado de expansibilidad según el índice de plasticidad como se presenta en la Tabla 8.

Índice de plasticidad (%)	0-15	10-35	20-55	>55
Grado de expansividad	Leve	Medio	Alto	Muy Alto

Tabla 8. Método de Holtz y Gibbs, función del índice de plasticidad (Holtz y Gibbs, 1954).

Holtz y Gibbs (1954) otra clasificación realizada por Holtz y Gibbs se encuentra en función del límite de contracción presentado en la Tabla 9.

Límite de contracción (%)	>12	10-12	<10
Peligro de hinchamiento	Bajo	Medio	Alto

Tabla 9. Método de Holtz y Gibbs, función del límite de contracción (Holtz y Gibbs, 1954).

Holtz y Gibbs (1956) una última clasificación realizada por los mismos autores, relaciona el índice plástico, el límite contracción y el porcentaje de expansión bajo una carga constante de 1 psi como se presenta en la Tabla 10.

Contenido de coloide (<0.001 mm) en %	Índice plástico	Límite de contracción	% Expansión bajo carga 1.0 psi	Grado de expansión
> 28	>35	<11	>30	Muy alto
20 – 13	25 – 41	7 – 12	20 – 30	Alto
13 – 23	15 – 28	10 – 16	10 – 30	Medio
< 15	<18	>15	<10	Bajo

Tabla 10. Clasificación de suelos expansivos basado en el contenido de coloides, índice plástico y límite de contracción (Holtz y Gibbs, 1956).

Holtz, Dakshanamurthy y Raman (1973) caracteriza el grado de expansión en función del índice de plasticidad, límite de contracción y límite líquido, siendo este último un nuevo parámetro en comparación con las realizadas previamente por Holtz & Gibbs como se presenta en la Tabla 11.

Grado de expansión	Índice de plasticidad	Límite de contracción	Límite Líquido
Bajo	< 18	> 15	20 – 35
Medio	15 – 25	10 – 15	35 -50
Alto	25 – 41	7 – 12	50 -70
Muy alto	> 35	< 11	> 70

Tabla 11. Grado de expansividad (Holtz y Dakshanamurthy y Raman, 1973).

Seed (1962) desarrollo una gráfica (Figura 13) para realizar una clasificación según el grado de expansividad para suelos expansivos en función de la actividad y de la fracción arcillosa inferior a 0.002 mm (Vélez, 2012).

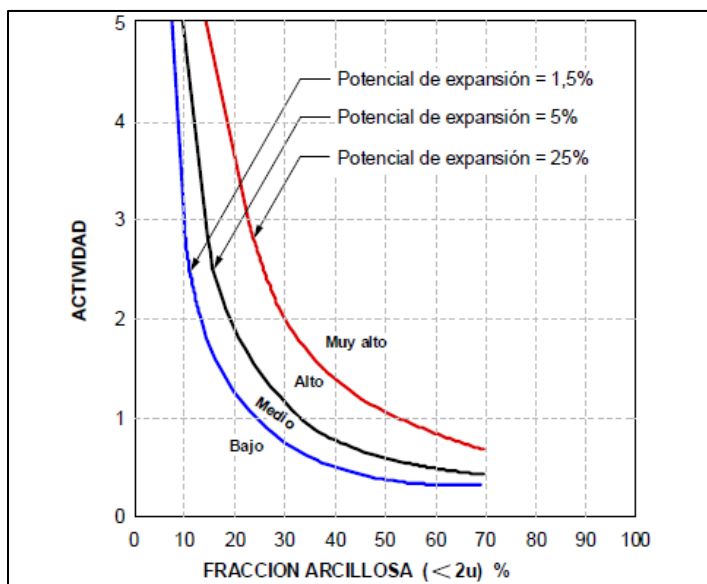


Figura 13. Potencial de hinchamiento en función de la actividad de las arcillas (Seed, 1962).

Se presenta el segundo grupo de correlaciones con tablas propuestas por varios autores como Ortiz (1975), González de Vallejo (2002) y Chen (1988), mencionados anteriormente para realizar la clasificación según el grado de expansividad como se presenta en las Tablas 12, 13 y 14.

Ortiz (1975)

Expansividad	LC	Ip	LL	% N200	% < 0.001 mm	Actividad (Skempton)	Sp (Seed) %	Lambe kg/cm ²	Presión de hinchamiento kg/cm ²	% de hinchamiento
Baja	>15	<18	<30	<30	<15	<0.5	0-1.5	<0.8	<0.3	<1
Media	12-16	15-28	30-40	30-60	13-23	0.5-0.7	1.5-5.0	0.8-1.5	0.3-1.2	1-5
Alta	8-12	25-40	40-60	60-95	20-30	0.7-1.0	5-25	1.5-2.3	1.2-3.0	3-10
Muy alta	<10	35	>60	>95	>30	>1.0	>25	>2.3	>3	>10

Tabla 12. Criterios de expansividad recopilados por R. Ortiz 1975.

González de Vallejo (2002)

Grado	Expansividad	% Finos	LL	Lambe (Kpa)	Presión de hinchamiento (Kpa)	% de Hinchamiento
I	Baja	<30	<35	<80	<25	<1
II	Baja a Media	30-60	35-50	80-150	25-125	1-4
III	Media a Alta	60-95	60-65	150-230	125-300	4-10
IV	Muy Alta	>95	>65	>230	>300	>10

Tabla 13. Grados de expansividad y valores medios de parámetros geotécnicos. (González de Vallejo, 2002).

Chen (1988)

Grado de Expansión	% Finos	LL	SPT	Expansión libre [%]	Presión de Hinchamiento
Muy Alto	>95	>60	>30	>10	>10
Alto	60-95	40-60	20-30	3-10	2.5-10
Medio	30-60	30-40	10-20	1-5	1.5-2.5
Bajo	<30	<30	<10	<1	<0.5

Tabla 14. Grado de expansión (Chen, 1988).

3.3.3 Porcentaje y presión de expansión.

A diferencia de las correlaciones empleadas para la clasificación del suelo según el tipo de mineral predominante y grado de expansividad, que emplean tablas o métodos gráficos, las correlaciones de porcentaje y presión de expansión utilizan ecuaciones para la obtención de estos valores. Las ecuaciones se encuentran en función de diferentes parámetros obtenidos en ensayos de laboratorio, los cuales no necesariamente provienen de ensayos de expansión. Las ecuaciones a emplear en este estudio se proceden a describir a continuación.

Seed (1962) expresión para el cálculo del porcentaje de expansión en función del índice de plasticidad elevado a un factor fijo.

$$SP = 0.00216PI^{2.44} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde:

- SP = Porcentaje de expansión (%)
- PI = Índice de plasticidad (%)

Komornik y David (1969) expresión para el cálculo de la presión de expansión en función del límite líquido, densidad seca y del contenido de humedad natural.

$$\log (Ps) = 2.132 + 0.0208 LL + 0.000665 \gamma_d - 0.0269 w \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde:

- Ps = Presión de expansión (kg/cm²)
- LL= Límite líquido (%)
- γ_d = Peso específico seco (kg/m³)
- w= Humedad (%)

Vijayvergiya y Ghazzaly (1973) expresión en función del límite líquido y la humedad natural en muestras inalteradas para el cálculo del porcentaje de expansión.



$$\log SP = \frac{1}{12}(0.44 * LL - w_{nat} + 5.5) \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde:

- SP= Porcentaje de expansión (%)
- LL= Límite líquido (%)
- w= Humedad natural (%)

Nayak y Christensen (1979) la expresión para el cálculo del porcentaje de expansión se encuentra en función del índice de plasticidad, contenido de partículas menores a 0.002 mm y la humedad natural.

$$SP = (0.0229) * (PI)^{1.45} * \frac{C}{w_{nat}} + 6.38 \quad (\text{Ecuación 19})$$

Donde:

- SP= Porcentaje de expansión (%)
- PI= Índice de plasticidad (%)
- C= Contenido de partículas menores a 0.002 mm (%)
- w= Humedad natural (%)

Schneider y Poor (1974) propone dos expresiones, tanto para el cálculo del porcentaje y presión de expansión que se encuentra en función del índice de plasticidad y la humedad natural, además de que se incluye el contenido de partículas menores a 0.002 mm para la presión de expansión.

$$Ps = (0.035817) * (PI)^{1.12} * \frac{C^2}{w_{nat}^2} + 3.7912 \quad (\text{Ecuación 20})$$

$$\text{Log}(SP) = \frac{0.9PI}{w_{nat}} - 1.19 \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde:

- Ps = Presión de expansión (kg/cm²)
- SP= Porcentaje de expansión (%)
- PI= Índice de plasticidad (%)
- C= Contenido de partículas menores a 0.002 mm (%)
- w= Humedad natural (%)



Chen (1988) calculó el porcentaje de expansión en función del índice de plasticidad.

$$SP = 0.2558e^{0.0838PI} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Donde:

- Sp= Porcentaje de expansión (%)
- PI= Índice de plasticidad (%)

Basma (1996) el autor plantea el cálculo del porcentaje de expansión en función del índice de plasticidad y el contenido de partículas menores a 0.002 mm.

$$SP = 0.00064PI^{1.37}C^{1.37} \quad (\text{Ecuación 23})$$

Donde:

- SP= Porcentaje de expansión (%)
- PI= Índice de plasticidad (%)
- C= Contenido de partículas menores a 0.002 mm (%)

Erguler y Ulusay (2003) los autores proponen la expresión del cálculo de la presión de expansión, interviniendo la humedad natural, límite líquido y el peso específico seco.

$$Ps = -227.27 + 2.14w_{nat} + 1.54LL + 72.49 \gamma_d \quad (\text{Ecuación 24})$$

Donde:

- Ps = Presión de expansión (N/cm²)
- W = Humedad natural (%)
- LL = Límite líquido (%)
- γ_d = Peso específico seco (g/cm³)

Sabtan (2005) cálculo del porcentaje y presión de expansión en función de la humedad natural, índice de plasticidad y contenido de partículas menores a 0.002 mm.

$$SP = 1.0 + 0.06(C + PI - w_{nat}) \quad (\text{Ecuación 25})$$

$$Ps = 135.0 + 2.0(C + PI - w_{nat}) \quad (\text{Ecuación 26})$$

Donde:

- SP = Porcentaje de expansión (%)
- Ps = Presión de expansión (kPa)



- C = Contenido de partículas menores a 0.002 mm (%)
- IP = Índice de plasticidad (%)
- W = Humedad natural (%)

Las correlaciones a emplear dentro del estudio para realizar la caracterización de un suelo expansivo según el tipo de mineral predominante, grado de expansividad y cuantificación (presión y porcentaje de expansión) son todas las propuestas anteriormente. Las cuales sus resultados se procederán a comparar con los obtenidos en laboratorio, como en el caso de los ensayos de expansión libre y expansión controlada con las correlaciones de cuantificación. Caso contrario a los resultados obtenidos del empleo de las correlaciones según el grado de expansividad obteniendo un resultado único general comparativo. Para las correlaciones según el tipo de mineral predominante se realiza algo similar con el caso del grado de expansividad obteniendo un resultado único general comparativo.



4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dentro del presente capítulo se indican los resultados obtenidos y se analizan los mismos. Se presenta en primer lugar resultados de los seis suelos finos estudiados de caracterización, en segundo lugar, los resultados de los ensayos de expansión, a continuación, el empleo de las correlaciones y finalmente un resumen global de todos los resultados obtenidos.

Dentro del proceso de caracterización de los suelos el objetivo principal es determinar el tipo de material con el que se está trabajando, en esa dirección, se presentan resultados de granulometría, granulometría por hidrómetro, clasificación por el método de la AASHTO y la SUCS. Además de la gravedad específica de cada muestra, valor el cual se utilizará para futuros cálculos.

De los ensayos de expansión se presenta valores de expansividad de las muestras de una manera directa, para lo cual se realizaron ensayos de expansión libre y expansión controlada. Además, se realizaron otros ensayos encaminados de igual manera a la obtención de valores de expansividad, pero de una manera indirecta mediante el empleo de correlaciones, siendo los ensayos de límites de Atterberg, hinchamiento libre en probeta y aparato de Lambe los realizados.

Los resultados de las correlaciones obtenidas se dividen en tres grupos siendo estos: según el tipo de mineral, el grado de expansividad y valores de expansión de presión y porcentaje de expansión, todos obtenidos de manera indirecta mediante el resultado de ensayos previos. El último grupo de correlaciones se compara con los ensayos directos de expansión libre y controlada.

Al finalizar la sección se presenta un resumen general de todos los resultados obtenidos tanto de manera directa como indirecta, se realiza además un análisis comparativo entre estas con inclusión de porcentajes de error y gráficas de correlaciones entre los diferentes ensayos.

4.1 Caracterización

4.1.1 Granulometría

Dentro del proceso de caracterización se partió con el análisis granulométrico de las muestras de suelo en estudio, a continuación, la Figura 14 presenta los resultados de granulometría por cribado para las diferentes muestras de suelo. En la Figura 14 se puede apreciar contenidos mínimos de suelo sobre el tamiz 200 para las muestras de Challuabamba, Miraflores y Gapal, existiendo predominancia de material fino en aproximadamente 86% para las muestras de Challuabamba y Miraflores y 63% para Gapal.

Algo distinto se observa para el caso de las muestras de Valle, Sidcay y de Azogues, las cuales muestran menor cantidad de material pasante. En el caso de Azogues se obtuvo material muy compactado en campo, tipo roca por lo cual el proceso de disgregación fue muy complejo y por lo tanto se observa una menor cantidad de finos que las demás muestras.

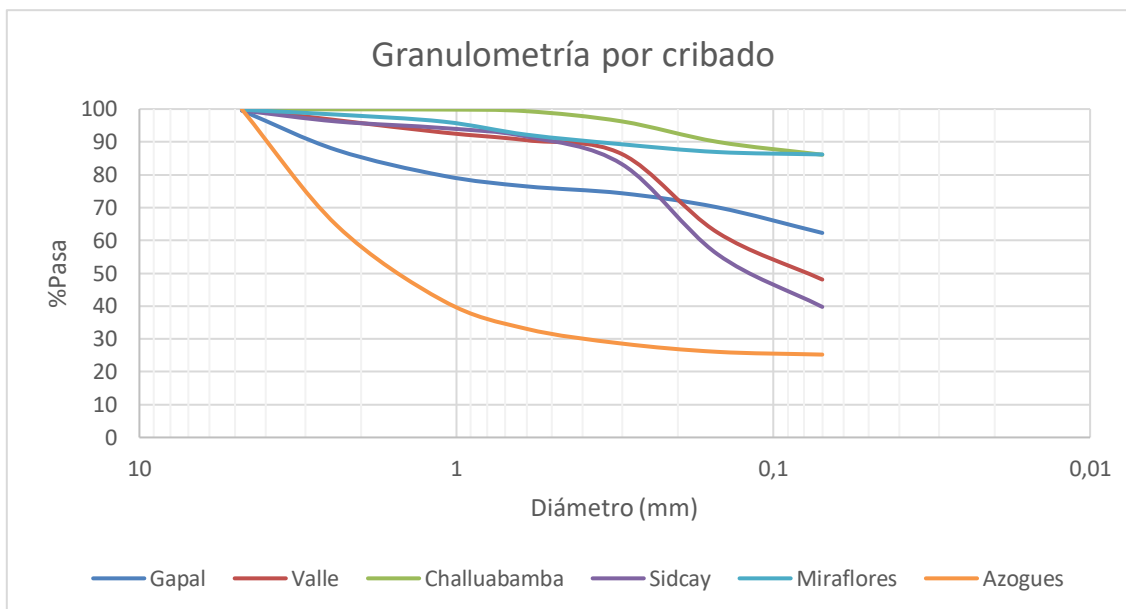


Figura 14. Resultados de granulometría por cribado.

Se puede presenciar un alto contenido de material fino por parte de las muestras de Challuabamba, Miraflores y Gapal en la Tabla 15, siendo éste el que provee las propiedades expansivas del suelo. Además de que un suelo con un porcentaje de material pasante por el tamiz N200 mayor al 50% es clasificado como suelo de grano fino limo o arcilla por el método de la SUCS, suelos que presentan un mayor potencial expansivo que uno granular con un menor contenido de finos y por lo tanto de arcilla.

(%)	Gapal	Valle	Challuabamba	Sidcay	Miraflores	Azogues
< N200	62.28	48.08	86.10	39.76	86.18	25.23

Tabla 15. Porcentaje que pasa el tamiz N 200.

4.1.2 Hidrómetro

Braja Das (2011) indica que cuando una muestra de suelo se dispersa en agua, las partículas se sedimentan a diferentes velocidades, esto dependerá de su tamaño, forma y peso, siguiendo los lineamientos de la ley de Stokes. Considerando necesario para las muestras en estudio, se realiza el análisis granulométrico por el método del hidrómetro con el material pasante del tamiz 200 con la finalidad de determinar el tamaño limo o arcilla presente en cada muestra. En la Figura 15 se

presenta el resultado obtenido luego de haber realizado la liga del material pasante de la granulometría, es decir la continuación de la granulometría después del tamiz N 200.

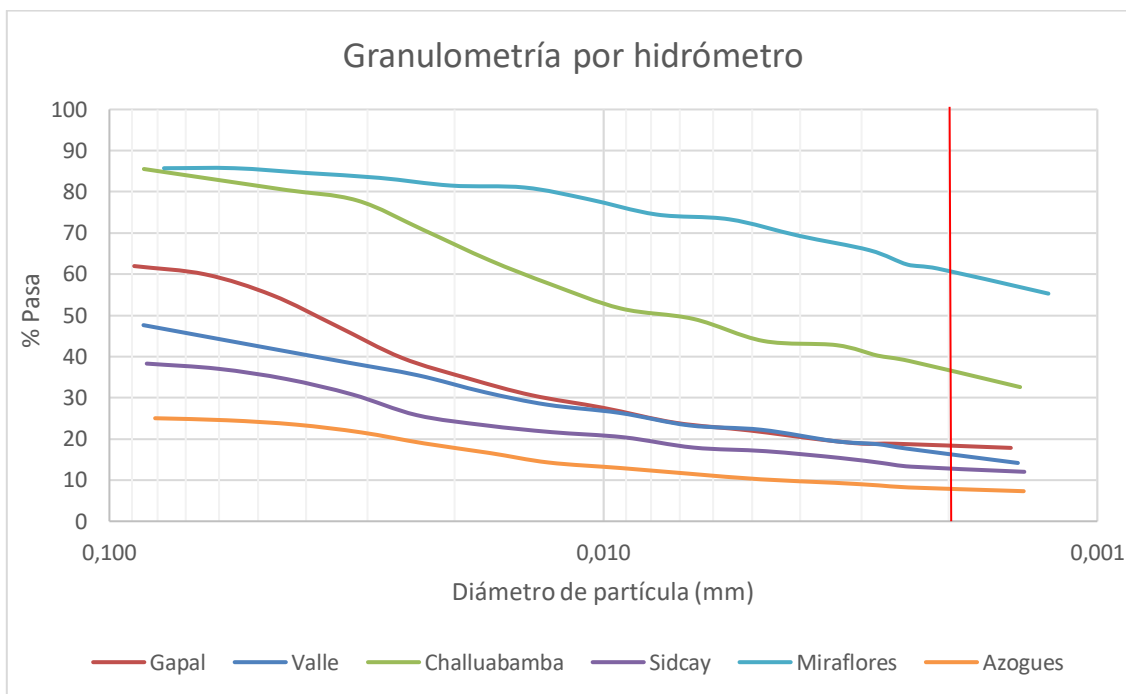


Figura 15. Resultados granulométría por hidrómetro.

Material inferior a 0.002 mm es considerado como tamaño arcilla por la AASHTO. En la Tabla 16 se presenta un resumen del porcentaje de material tamaño arcilla para los suelos en estudio. Se puede observar que la muestra de Miraflores es la que presenta un mayor contenido de arcilla. Challuabamba presenta de igual forma un valor elevado de arcilla con más de la cuarta parte de la muestra. Para los demás suelos la arcilla se encuentra presente en menos al 20% de todo el material, siendo el porcentaje más bajo para Azogues, se aclara nuevamente que los resultados granulométricos del material tipo Azogues dependen del grado de disgregación se ha logrado conseguir, lastimosamente no representan la verdadera granulometría del material.

	Gapal	Valle	Challuabamba	Sidcay	Miraflores	Azogues
% Arcilla	18.82	17.48	36.25	12.17	61.12	8.23

Tabla 16. Porcentaje de arcilla.

El ensayo por hidrómetro es más representativo para material fino que pasa por el tamiz N200 que el realizado por cribado. Además de que es de suma importancia conocer la cantidad de arcilla que tiene la muestra, siendo este un valor que interviene al momento del empleo de las correlaciones.

4.1.3 Clasificación de Suelo

A continuación, se muestran los resultados para clasificación de los diferentes suelos según los criterios de dos organizaciones: AASHTO y SUCS. Para cada muestra se indican los datos tomados en consideración para realizar la clasificación.

4.1.3.1 GAPAL

- AASHTO

La muestra se clasificó como un suelo del tipo A7-6 (suelo arcilloso) bajo los siguientes parámetros:

% Pasa malla N200	Límite Líquido (LL)	Índice de Plasticidad (IP)	IP<LL-30	IG
62.28	40.4	16.92	NO	8.78 ≈ 9

Tabla 17. *Propiedades clasificación AASHTO Gapal.*

- El porcentaje de material que pasa el tamiz N°200 es mayor a 35% por lo cual no es del tipo A1, A2 ni A3.
- El límite líquido es mayor a 40, siendo posible que sea un A5 o A7.
- El índice de plasticidad es mayor a 11 por lo cual se restringe únicamente a un A7.
- La relación $IP < LL-30$ no se cumple siendo clasificado como un suelo **A7-6**.

- SUCS

La muestra se clasificó como una arcilla de baja plasticidad con los siguientes parámetros, indicados en la tabla a continuación:

% pasa malla N200	LL	IP
62.28	40.4	16.92

Tabla 18. *Propiedades clasificación SUCS Gapal.*

- Más del 50% pasa el tamiz N200, por lo cual es un suelo de grano fino.
- Límite líquido inferior a 50.
- Índice de plasticidad mayor a 7.
- Dando como resultado un suelo tipo **CL** arcilla de baja plasticidad.

4.1.3.2 VALLE

- AASHTO

La muestra se clasificó como un suelo del tipo A7-6 (suelo arcilloso) bajo los siguientes parámetros:

% pasa malla N200	Límite Líquido (LL)	Índice de Plasticidad (IP)	IP<LL-30	IG
48.08	42.50	18.67	NO	5.64 ≈ 6

Tabla 19. *Propiedades clasificación AASHTO Valle.*



- El porcentaje de material que pasa el tamiz N°200 es mayor a 35% por lo cual no es del tipo A1, A2 ni A3.
- El límite líquido es mayor a 40, siendo posible que sea un A5 o A7.
- El índice de plasticidad es mayor a 11 por lo cual se restringe únicamente a un A7.
- La relación $IP < LL-30$ no se cumple siendo clasificado como un suelo **A7-6**.

- **SUCS**

La muestra se clasificó como una arena arcillosa con los siguientes parámetros:

% Grueso	% Arena	% pasa malla N200	LL	IP
0	51.92	48.08	42.50	18.67

Tabla 20. *Propiedades clasificación SUCS Valle.*

- Menos del 50% pasa el tamiz N200, por lo cual es un suelo de grano grueso.
- Más del 50% pasa el tamiz N.4 siendo arena.
- % finos mayor a 12%.
- IP mayor a 7.
- Dando como resultado un suelo tipo **SC** arena arcillosa.

4.1.3.3 CHALLUABAMBA

- **AASHTO**

La muestra se clasificó como un suelo del tipo A7-6 (suelo arcilloso) bajo los siguientes parámetros:

% pasa malla N200	Límite Líquido (LL)	Índice de Plasticidad (IP)	$IP < LL-30$	IG
86.10	63.30	41.95	NO	$38.8 \approx 39$

Tabla 21. *Propiedades clasificación AASHTO Challuabamba.*

- El porcentaje de material que pasa el tamiz N°200 es mayor a 35% por lo cual no es del tipo A1, A2 ni A3.
- El límite líquido es mayor a 40, siendo posible que sea un A5 o A7.
- El índice de plasticidad es mayor a 11 por lo cual se restringe únicamente a un A7.
- La relación $IP < LL-30$ no se cumple siendo clasificado como un suelo **A7-6**.

- **SUCS**

La muestra se clasificó como una arcilla de alta plasticidad con los siguientes parámetros:

% pasa malla N200	LL	IP
86.10	63.30	41.95

Tabla 22. *Propiedades clasificación SUCS Challuabamba.*



- Más del 50% pasa el tamiz N200, por lo cual es un suelo de grano fino.
- Límite líquido mayor a 50.
- Índice de plasticidad mayor a 7.
- Dando como resultado un suelo tipo **CH** arcilla de alta plasticidad.

4.1.3.4 SIDCAY

- AASHTO

La muestra se clasificó como un suelo del tipo **A6** (suelo arcilloso) bajo los siguientes parámetros:

% pasa malla N200	Límite Líquido (LL)	Índice de Plasticidad (IP)	IP<LL-30	IG
39.76	24.50	11.46	NO	0.94 ≈ 1

Tabla 23. *Propiedades clasificación AASHTO Sidcay.*

- El porcentaje de material que pasa el tamiz N°200 es mayor a 35% por lo cual no es del tipo A1, A2 ni A3.
- El límite líquido es menor a 40, siendo posible que sea un A4 o A6.
- El índice de plasticidad es mayor a 11 por lo cual se restringe únicamente a un A6.

- SUCS

La muestra se clasificó como una arena arcillosa con los siguientes parámetros:

% Grueso	% Arena	% Pasa malla N200	LL	IP
0	60.24	39.76	24.50	11.46

Tabla 24. *Propiedades clasificación SUCS Sidcay.*

- Menos del 50% pasa el tamiz N200, por lo cual es un suelo de grano grueso.
- Más del 50% pasa el tamiz N.4 siendo arena.
- % finos mayor a 12%.
- IP mayor a 7%.
- Dando como resultado un suelo tipo **SC** arena arcillosa.

4.1.3.5 MIRAFLORES

- AASHTO

La muestra se clasificó como un suelo del tipo A7-6 (suelo arcilloso) bajo los siguientes parámetros:

% pasa malla N200	Límite Líquido (LL)	Índice de Plasticidad (IP)	IP<LL-30	IG
86.18	88.40	61.13	NO	59.01 ≈ 59

Tabla 25. *Propiedades clasificación AASHTO Miraflores.*

- El porcentaje de material que pasa el tamiz N°200 es mayor a 35% por lo cual no es del tipo A1, A2 ni A3.
- El límite líquido es mayor a 40, siendo posible que sea un A5 o A7.
- El índice de plasticidad es mayor a 11 por lo cual se restringe únicamente a un A7.
- La relación $IP < LL - 30$ no se cumple siendo clasificado como un suelo **A7-6**.

- **SUCS**

La muestra se clasificó como una arcilla de alta plasticidad (CH) acorde lo siguiente:

% pasa malla N200	LL	IP
86.18	88.40	61.13

Tabla 26. *Propiedades clasificación SUCS Miraflores.*

- Más del 50% pasa el tamiz N200, por lo cual es un suelo de grano fino.
- Límite líquido mayor a 50.
- Índice de plasticidad mayor a 7.
- Dando como resultado un suelo tipo **CH** arcilla de alta plasticidad.

4.1.3.6 AZOGUES

- **AASHTO**

La muestra se clasificó como un suelo del tipo **A-2-7** (grava arcillosa) bajo los siguientes parámetros:

% pasa malla N200	Límite Líquido (LL)	Índice de Plasticidad (IP)	IG
25.23	48.40	12.25	-2.13 \approx 0

Tabla 27. *Propiedades clasificación AASHTO Azogues.*

- El porcentaje de material que pasa el tamiz N°200 es menor a 35% por lo cual es del tipo A1, A2 o A3.
- El límite líquido es mayor a 40, siendo posible que sea un A-2-5 o A-2-7.
- El índice de Plasticidad es mayor a 11, restringiéndose únicamente a un A – 2 -7.

- **SUCS**

La muestra se clasificó como una arena arcillosa con los siguientes parámetros:

% Grueso	% Arena	% Pasa malla N200	LL	IP
0	74.77	25.23	48.40	12.25

Tabla 28. *Propiedades clasificación SUCS Azogues.*

- Menos del 50% pasa el tamiz N200, por lo cual es un suelo de grano grueso.
- Más del 50% pasa el tamiz N.4 siendo arena.
- % finos mayor a 12%.
- IP mayor a 7.
- Dando como resultado un suelo tipo **SC** arena arcillosa.

4.1.3.7 RESUMEN CLASIFICACIÓN

Se tienen suelos resultantes del tipo arcilloso para todas las muestras por clasificación de la AASHTO, excepto la muestra de Azogues clasificándose como una grava arcillosa como se presenta en la Tabla 29.

En el caso de la clasificación por el método SUCS se tiene un resumen de los resultados en la Tabla 29, la clasificación muestra arcillas de alta plasticidad para las muestras de Challuabamba y Miraflores, siendo este un parámetro importante a tomar en cuenta para la clasificación según su expansividad. Gapal se clasifica como un suelo de baja plasticidad. En el caso de Valle, Sidcay y la Azogues todas se clasifican como arenas arcillosas, teniendo en parte arcilla, pero no de manera predominantemente.

Muestra	AASHTO	SUCS
Gapal	A7-6 Arcilloso	CL Arcilla Baja Plasticidad
Valle	A7-6 Arcilloso	SC Arena Arcillosa
Challuabamba	A7-6 Arcilloso	CH Arcilla Alta Plasticidad
Sidcay	A6 Arcilloso	SC Arena Arcillosa
Miraflores	A7-6 Arcilloso	CH Arcilla Alta Plasticidad
Azogues	A2-7 Grava Arcillosa	SC Arena Arcillosa

Tabla 29. Resumen clasificación suelo.

Se tiene una concordancia entre las dos clasificaciones ya que ambas indican la presencia de arcilla en todas las muestras. Por el método de la SUCS se detalla si el predominio sigue siendo material fino o granular, obteniéndose que para la muestra de Gapal, Challuabamba y Miraflores son arcillas y para las demás existe el predominio de la arena que contiene arcilla en menor cantidad que las anteriores muestras, como se presentó en la Tabla 29.

La comparación de clasificación de suelos por el método de la AASHTO y la SUCS da un resultado más detallado para el segundo método. Además de que se da la inclusión de una sub clasificación por plasticidad para el método de SUCS cuando se trata de un suelo arcilloso como se presenta en la Tabla 30, siendo este un valor de suma importancia para el estudio.

Muestra	Tipo de Suelo
	SUCS
Gapal	CL Arcilla Baja Plasticidad
Valle	SC Arena Arcillosa
Challuabamba	CH Arcilla Alta Plasticidad
Sidcay	SC Arena Arcillosa
Miraflores	CH Arcilla Alta Plasticidad
Azogues	SC Arena Arcillosa

Tabla 30. Resumen tipo de suelo.

4.1.4 Peso específico de la fase sólida

La gravedad específica es un valor que identifica la relación entre el peso y volumen que el material este ocupa en su fase sólida. Los resultados para las diferentes muestras son los presentados en la Tabla 31.

	Gapal	Valle	Challuabamba	Sidcay	Miraflores	Azogues
Gs	2.699	2.658	2.815	2.657	2.832	2.730

Tabla 31. *Peso específico de la fase sólida.*

4.2 Expansividad

En procura de revisar la capacidad expansiva de un suelo se puede proceder de varias maneras según lo indicado en la sección de metodología. Se puede analizar los límites de Atterberg y a través de correlaciones llegar al potencial expansivo del material, por otro lado, se puede ejecutar ensayos de expansión libre y expansión controlada para la obtención de valores de expansividad de manera directa. Además de la realización del ensayo de expansión libre en probeta y aparato de Lambe para tener una caracterización según el grado de expansividad del material.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos descritos preliminarmente en esta sección.

4.2.1 Límites de Atterberg

Según la caracterización realizada en el literal anterior, se obtuvieron los resultados para límite líquido, plástico, contracción e índice de plasticidad, además de la actividad de todas las muestras. A continuación, la Tabla 32 resume todos los resultados obtenidos, los mismos que serán usados para aproximar la capacidad expansiva de los suelos a través de correlaciones.

Muestra	Límite Líquido	Límite Plástico	Límite Contracción	Índice Plasticidad	Actividad
Gapal	40.40	23.48	25.40	16.92	0.9
Valle	42.50	23.83	27.20	18.67	1.1
Challuabamba	63.30	21.35	12.90	41.95	1.2
Sidcay	24.50	13.04	19.90	11.46	1
Miraflores	88.40	27.27	13.60	61.13	0.9
Azogues	48.40	36.15	18.10	12.25	1.5

Tabla 32. *Resultados Límites de Atterberg.*

Zambrano & Nieto (2018) indican que, un índice de plasticidad menor a 4% constituye un indicio de un contenido mayor de limos que de arcillas, favoreciendo de manera directa a la permeabilidad del suelo. Por lo cual, si cuenta con menor cantidad de arcilla presentará un potencial expansivo menor. Las muestras que presentan un mayor valor de índice de plasticidad son Miraflores y Challuabamba, lo cual coincide con el resultado de contenido de arcilla del ensayo de Hidrómetro.

En las muestras analizadas, casi todas las muestras, exceptuando Sidcay, presentan límites líquidos mayores a 40% y siendo de mayor contenido Miraflores y Challuabamba.

Además, se obtuvo los resultados por el método de la penetración en cono, presentados en la Tabla 33.

	Límite Líquido	Límite Líquido	Variación
Muestra	Penetración cono	Casagrande	%
Gapal	42.5 %	40.4 %	2.1
Valle	46.2 %	42.5 %	3.7
Challuabamba	57.8 %	63.3 %	-5.5
Sidcay	30.0 %	24.5 %	5.5
Miraflores	98.0 %	88.4 %	9.6
Azogues	56.2 %	48.4 %	3.8

Tabla 33. *Penetración cono.*

El resultado obtenido coincide de cierta manera con el elaborado por Arbito (2019), en cuyos estudios se obtienen valores de límite líquido mayores con el cono de penetración alrededor entre 6 y 9 puntos de diferencia que con los obtenidos por el método convencional de Casagrande.

En el caso de estudio se obtiene para casi todas las muestras una sobreestimación del valor del límite líquido entre 2 a 10% de incremento cuando se usa el método de penetración del cono. La muestra de Challuabamba presenta una subestimación en 5.5% como se presenta en la Tabla 33.

4.2.2 Expansión Libre

Para los ensayos de expansión libre se utilizaron 2 muestras de cada tipo de suelo optando por una tercera si se presentan valores diferentes en más de 0.2%. En el caso de estudio no se presentó una variación mayor a este porcentaje por lo cual no fue necesario de una tercera muestra. Las muestras se obtuvieron de una profundidad aproximada de 60 cm manteniendo su humedad natural. Se sigue la norma ASTM D 4829 para la realización de este ensayo.

Se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de expansión libre en la Tabla 34 para la muestra de Gapal. En la tabla se presenta el resultado en porcentaje de expansión conseguido, además de las características de saturación y humedad de las muestras antes y después del ensayo. Se eligen estas dos propiedades fundamentales ya que se consideran indicadores de la eficiencia del ensayo de expansión.

Muestra	Porcentaje expansión	Humedad Inicial	Saturación Inicial	Humedad Final	Saturación Final	Peso específico seco	Índice de expansión
Gapal	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm ³)	
1	1.04	32.75	87.32	38.76	103.33	1.34	10.43
2	0.99	33.16	84.37	36.41	92.61	1.31	9.92

Tabla 34. Resultados Expansión Libre Gapal.

Para las dos muestras se tienen valores de humedad, saturación inicial y densidad seca similar por lo cual son comparables entre sí. La saturación que se obtuvieron en las dos muestras es cercana al 100%. Se puede considerar que las muestras desarrollan su potencial expansivo ya que consiguen aproximarse a una saturación completa. Además de que se tiene un valor elevado de saturación inicial por lo cual no presenta una expansión fuerte.

Durante los primeros minutos se obtuvo una expansión rápida, después de esta expansión rápida se presenta un crecimiento medio hasta los 400 minutos y luego el porcentaje de expansión no aumenta considerablemente hasta dar por terminado el ensayo como se presenta en la Figura 16.

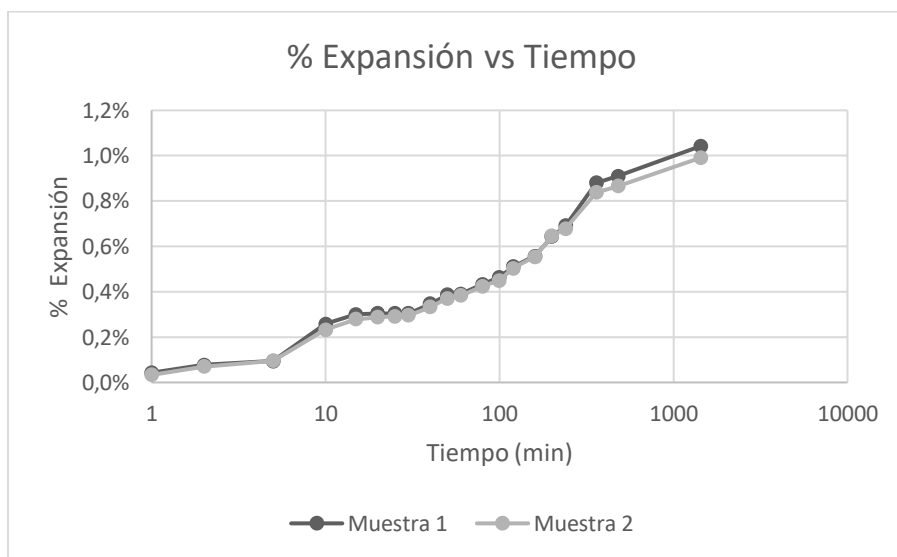


Figura 16. Expansión Libre Gapal.

Se presenta los resultados obtenidos en el ensayo de expansión libre en la Tabla 35 para la muestra de Valle.

Muestra	Porcentaje expansión	Humedad Inicial	Saturación Inicial	Humedad Final	Saturación Final	Peso específico seco	Índice de expansión
Valle	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm ³)	
1	0.47	26.99	48.44	53.37	95.76	1.07	4.69
2	0.48	21.62	53.54	44.32	109.76	1.11	4.83

Tabla 35. Resultados Expansión Libre Valle.

Para la muestra de Chilcapamba (Valle) tiene valores de humedad y saturación iniciales cercanas entre sí. Los resultados presentan un comportamiento similar al suelo de Gapal respecto de la saturación llegando a valores alrededor del 100%, por lo que de igual manera se considera que desarrolla su potencial expansivo.

La muestra a comparación de Gapal presenta una expansión de manera rápida en los primeros minutos alcanzando su máximo potencial en los primeros 30 minutos, lo cual concuerda con un grado de saturación inicial inferior al que se tenía para la muestra anteriormente mencionada. Además, con respecto al suelo anterior tiene un porcentaje de expansión menor como se presenta en la Figura 17.

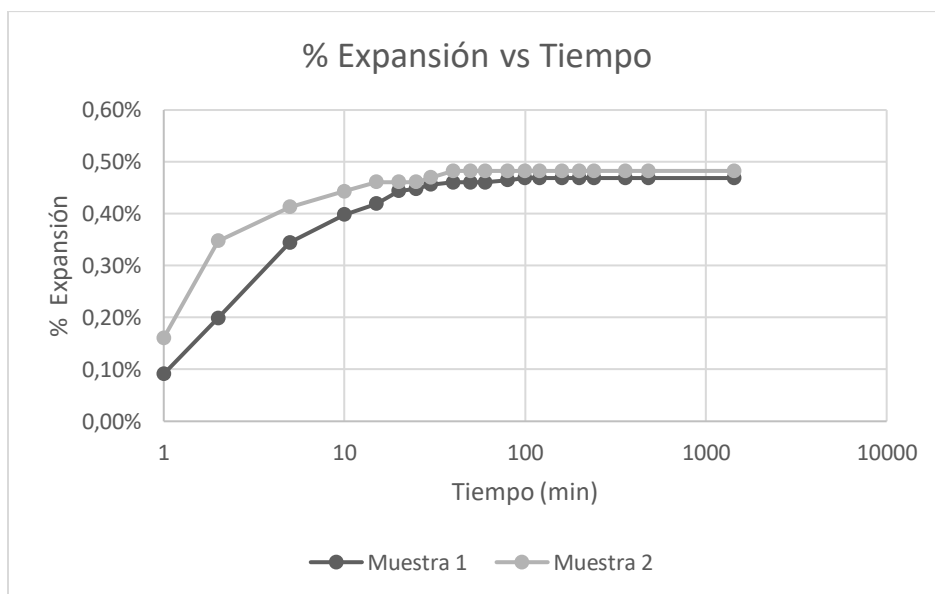


Figura 17. *Expansión Libre Valle.*

Se presenta los resultados obtenidos en el ensayo de expansión libre en la Tabla 36 para la muestra de Challuabamba.

Muestra	Porcentaje expansión	Humedad Inicial	Saturación Inicial	Humedad Final	Saturación Final	Peso específico seco	Índice de expansión
Challuabamba	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm ³)	
1	2.63	31.20	71.77	41.61	95.64	1.27	26.26
2	2.51	31.31	76.74	41.25	101.05	1.31	25.08

Tabla 36. *Resultados Expansión Libre Challuabamba.*

Se tiene valores de humedad semejantes entre sí y saturación inicial cercanos por lo cual las muestras son comparables. La muestra 2 de Challuabamba alcanza la saturación total de la muestra alcanzando todo su potencial expansivo, la muestra 1 se encuentra cerca del valor de saturación completa. Además, el índice de expansión es elevado en comparación con las dos anteriores muestras.

La muestra presenta dos crecimientos, uno inicial de poco porcentaje de expansión en los primeros 100 minutos y el segundo ya de mayor representatividad en un lapso de 200 minutos, luego se presenta un crecimiento lento hasta finalizar el ensayo. El suelo de Challuabamba en los primeros minutos presenta un porcentaje de expansión pequeño, posteriormente presenta ya un crecimiento significativo de la muestra, similar a un crecimiento escalonado como se muestra en la Figura 18.

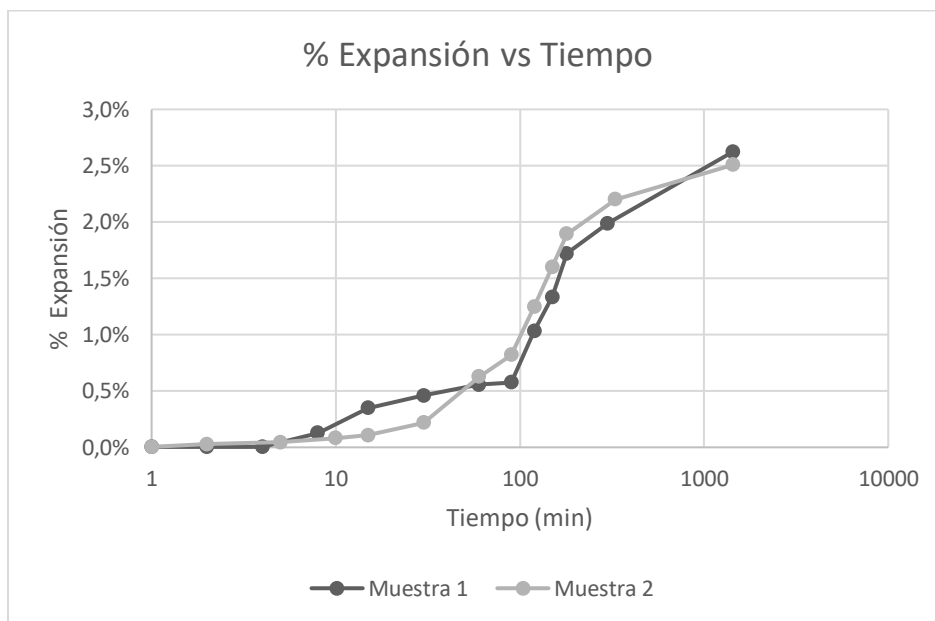


Figura 18. *Expansión Libre Challuabamba.*

Se presenta los resultados obtenidos en el ensayo de expansión libre en la Tabla 37 para la muestra de Sidcay.

Muestra	Porcentaje expansión	Humedad Inicial	Saturación Inicial	Humedad Final	Saturación Final	Peso específico seco	Índice de expansión
Sidcay	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm ³)	
1	0.94	17.90	58.70	30.02	98.43	1.47	9.36
2	0.90	19.62	57.59	32.10	94.19	1.39	9

Tabla 37. *Resultados Expansión Libre Sidcay.*

Se tienen parámetros iniciales de humedad y saturación similares entre sí. La muestra de Sidcay alcanza la saturación cercana al 100%, por lo cual desarrolla su potencial expansivo. No se presencia una variación representativa entre los diferentes parámetros finales calculados de las dos muestras. El valor de porcentaje de expansión es similar al obtenido de la muestra de Gapal.

En la Figura 19 de la expansión libre Sidcay se presencia un hinchamiento rápido dentro los primeros 100 minutos, esto debido a que la muestra presenta una

saturación un poco mayor al 50% y un segundo crecimiento más lento en un lapso de 300 minutos, luego presentándose un crecimiento casi nulo hasta finalizar el ensayo.

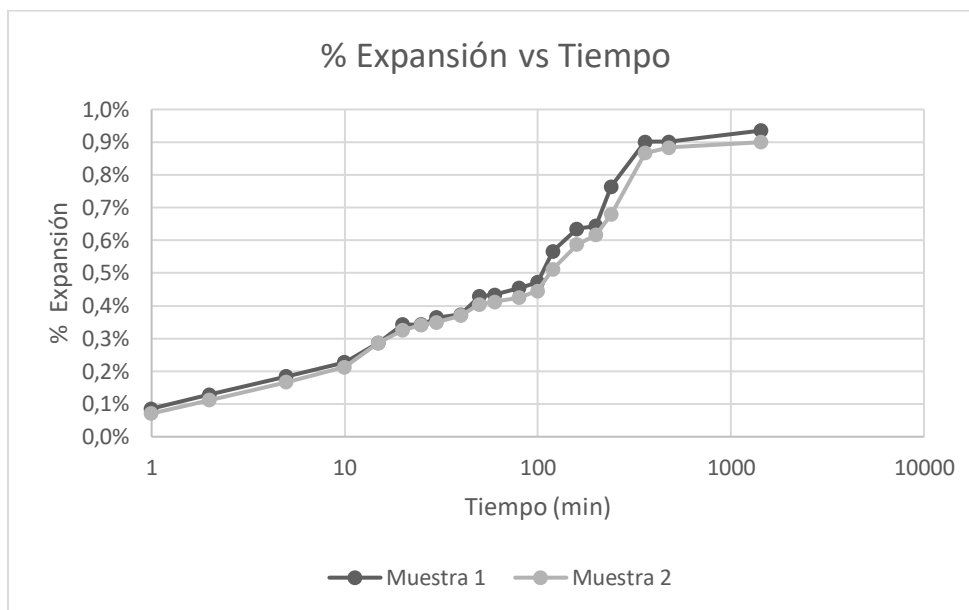


Figura 19. *Expansión Libre Sidcay.*

Se presenta los resultados obtenidos en el ensayo de expansión libre en la Tabla 38 para la muestra de Miraflores.

Muestra	Porcentaje expansión	Humedad Inicial	Saturación Inicial	Humedad Final	Saturación Final	Peso específico seco	Índice de expansión
Miraflores	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm ³)	
1	2.89	27.78	70.40	35.77	90.60	1.34	28.89
2	3.08	24.13	69.71	31.15	89.91	1.43	30.78

Tabla 38. *Resultados Expansión Libre Miraflores.*

Los parámetros iniciales para la muestra de Miraflores son valores cercanos entre sí, tanto de humedad como de saturación. Con una humedad final menor se consigue una saturación final menor como en el caso de la muestra 2. Miraflores tiene el mayor índice de expansión de todas las muestras.

Se observa un crecimiento rápido y elevado durante los primeros 100 minutos, posteriormente presenta un crecimiento lento hasta llegar a ser nulo antes de finalizar el ensayo como se presenta en la Figura 20.

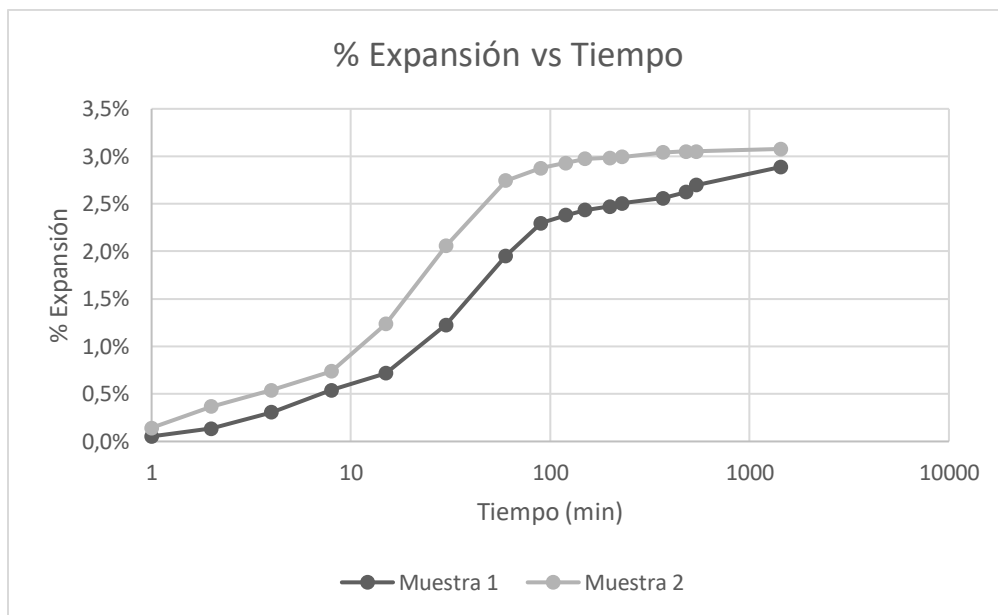


Figura 20. *Expansión Libre Miraflores.*

Se presenta los resultados obtenidos en el ensayo de expansión libre en la Tabla 39 para la muestra de Azogues.

Muestra	Porcentaje expansión	Humedad Inicial	Saturación Inicial	Humedad Final	Saturación Final	Peso específico seco	Índice de expansión
Azogues	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm ³)	
1	2.29	20.20	73.7	26.52	96.67	1.56	22.86
2	2.18	24.17	82.49	27.50	93.80	1.52	21.75

Tabla 39. *Expansión Libre Azogues.*

La muestra de Azogues presenta un índice de expansión alto. Además, que muestra una elevada saturación inicial en sus dos muestras. Al finalizar el ensayo las dos muestras aumentan este parámetro llegando a ser cercanos al 100%.

La muestra tiene un crecimiento elevado en los primeros 50 minutos y un crecimiento rápido lineal elevado durante los primeros 100 minutos. Luego de este crecimiento rápido presenta un crecimiento leve hasta los 400 minutos donde llega a su punto máximo, creciendo finalmente de manera casi nula hasta finalizar el ensayo como se presenta en la Figura 21.

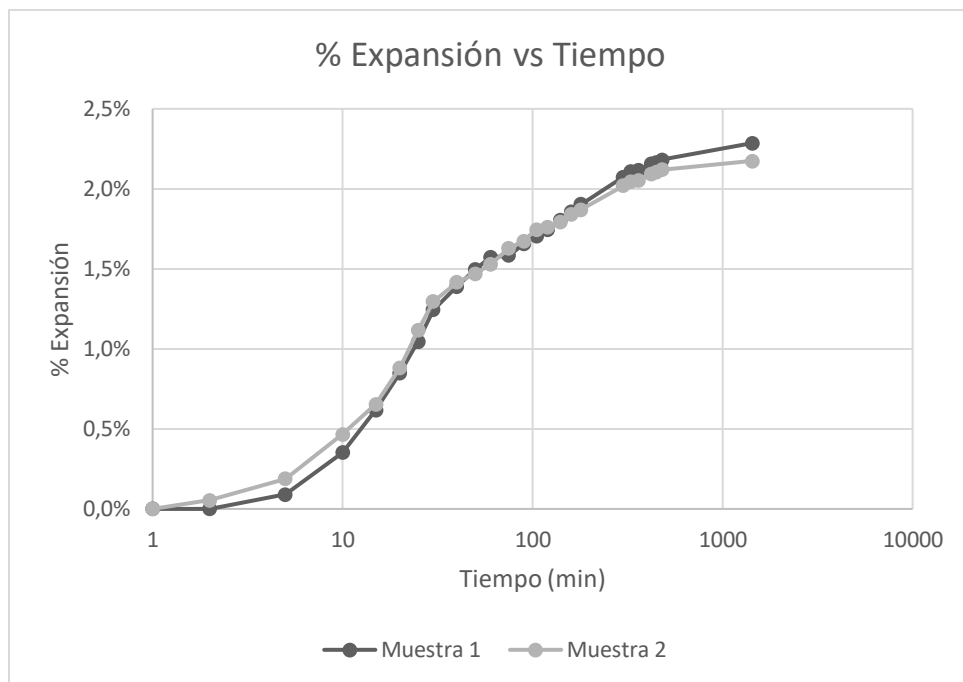


Figura 21. *Expansión Libre Azogues.*

Para las muestras de Miraflores, Challuabamba y Azogues se obtuvieron resultados de expansión mayores al 2% inclusive llegando hasta el 3%. Caso contrario, las muestras de Gapal, Valle y Sidcay presentan valores de 1% hasta del 0.5% como se presenta en la Tabla 40.

Muestra	Expansión Libre %
Gapal	1.043
Valle	0.483
Challuabamba	2.626
Sidcay	0.936
Miraflores	3.078
Azogues	2.286

Tabla 40. *Resultados expansión libre.*

Se tuvo precaución durante el traslado de todas las muestras para mantener su humedad natural, simulando condiciones naturales de campo las cuales pertenecerían a humedades típicas en la temporada de invierno según la época del año en la que se generó el muestreo. Cabe recalcar que algunas muestras presentan grado de saturación superior al 100%, conociendo que estos valores no son reales, se debería entender estos resultados como aproximados o referenciales, entendiendo que toda medición el laboratorio está sujeta a imprecisiones de ensayo o de medida.

4.2.3 Expansión Controlada

Para los ensayos de expansión controlada se utilizaron 2 muestras de cada tipo de suelo optando por una tercera si se presentan casos de resultados discordantes entre sí. Las muestras se obtuvieron de una profundidad aproximada a 60 cm manteniendo su humedad natural. Se sigue la norma ASTM D4829 para la realización de este ensayo y se realizan cálculos de humedad y saturación para cada muestra antes y después del ensayo, de esta manera se puede revisar si la muestra fue capaz de absorber agua y en qué cantidad.

Muestra	Presión expansión	Humedad Inicial	Saturación Inicial	Humedad Final	Saturación Final	Peso específico seco
Gapal	(kg/cm ²)	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm ³)
1	0.0214	25.07	65.89	35.64	93.64	1.33
2	0.0206	26.85	72.22	35.80	96.29	1.35
3	0.0095	23.37	68.37	30.59	89.51	1.40

Tabla 41. *Expansión Controlada Gapal.*

Se obtuvo una ligera variación de resultados en expansión controlada para las dos primeras muestras de Gapal según se indica en la Tabla 41, siendo el resultado promedio de 0.021 kg/cm². El resultado de una tercera muestra no se considera ya que presentó menor presión de expansión que las dos muestras iniciales con un valor de 0.0095 kg/cm² con propiedades iniciales similares a las anteriores muestras, caso contrario de las propiedades finales en la cual presenta una saturación y humedad final menor de todas. Además, se obtuvieron valores semejantes para valores de saturación y densidad seca respectivamente, llegando a valores de saturación casi completa de las dos primeras muestras consideradas.

Se realizó de igual forma el ensayo para dos muestras de Valle las cuales presentaron resultados de presión de expansión bastante baja, según se muestra en la Tabla 42. Comparando estos resultados con las muestras de otros suelos, resultan ser los de menor magnitud.

Muestra	Presión expansión	Humedad Inicial	Saturación Inicial	Humedad Final	Saturación Final	Peso específico seco
Valle	(kg/cm ²)	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm ³)
1	0.013	35.85	71.55	41.34	82.50	1.14
2	0.013	32.59	58.17	40.17	71.71	1.07

Tabla 42. *Expansión Controlada Valle.*

Para los valores de presión de expansión se obtuvo valores iguales para las dos muestras, con un promedio de 0.013 kg/cm², sin embargo, los valores de saturación final y de densidad seca presentan una pequeña variación entre sí. Cabe destacar que se obtuvo un valor de saturación final relativamente bajo para las dos muestras, pero siendo la muestra dos que presenta menor valor.

Para las muestras de Challuabamba se presentan los resultados en la Tabla 43. Los resultados de presión de expansión resultan superiores a los encontrados para las dos muestras anteriores.

Muestra	Presión expansión	Humedad Inicial	Saturación Inicial	Humedad Final	Saturación Final	Peso específico seco
Challuabamba	(kg/cm ²)	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm ³)
1	0.089	37.98	87.02	42.35	97.03	1.26
2	0.095	38.05	98.89	41.23	107.15	1.35
3	0.063	36.39	98.36	39.11	105.72	1.38

Tabla 43. *Expansión Controlada Challuabamba.*

Los valores iniciales de humedad son semejantes entre sí, mas no de su saturación inicial que presenta un valor mayor para la segunda muestra de igual forma para su saturación final. Se obtuvo un resultado promedio de las muestras de 0.092 kg/cm² siendo necesario de tres ensayos en el cual se descartó los resultados de uno de ellos por ser de un resultado muy inferior, siendo el caso de la tercera muestra con un valor de 0.063 kg/cm². Se obtuvieron valores de saturación alrededor del 100% de todas las muestras.

La muestra de Sidcay muestra resultados bajos en presión de expansión como se presenta en la Tabla 44.

Muestra	Presión expansión	Humedad Inicial	Saturación Inicial	Humedad Final	Saturación Final	Peso específico seco
Sidcay	(kg/cm ²)	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm ³)
1	0.0174	7.88	29.55	27.49	103.10	1.56
2	0.0190	6.70	28.39	20.57	87.19	1.63

Tabla 44. *Expansión Controlada Sidcay.*

Los resultados de presión de expansión en promedio se obtuvieron un valor de 0.0182 kg/cm². Se tiene resultados de humedad inicial considerablemente bajos, inferiores al 10% diferente entre sí, lo cual de cierta manera hace que exista una variación en los resultados posteriores como grado de saturación y de densidad seca; sin embargo, las variaciones no son significativas.

Para las muestras de Miraflores se realizó tres ensayos, en el cual uno de ellos no se consideró por presentar un valor de 0.0227 kg/cm² siendo muy inferior a comparación de las otras dos muestras y teniendo una saturación final inferior de todas las muestras obtenido de los resultados de la Tabla 45.

Muestra	Presión expansión	Humedad Inicial	Saturación Inicial	Humedad Final	Saturación Final	Peso específico seco
Miraflores	(kg/cm ²)	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm ³)
1	0.0713	22.86	64.26	31.43	88.36	1.41
2	0.0648	20.44	61.79	26.88	81.29	1.46
3	0.0227	20.73	53.62	24.01	62.10	1.35

Tabla 45. *Expansión Controlada Miraflores.*

Se tiene un promedio de 0.0681 kg/cm² de presión de expansión. Se presenta una saturación mayor de la muestra 1 la cual a su vez tiene una presión de expansión mayor que la muestra 2. Además, la muestra 1 presenta una densidad seca menor pero no tan discordante con la muestra 2. Se puede observar un grado de saturación alcanzado, relativamente bajo. La muestra 1 incrementa su saturación en 24% aproximadamente y la muestra 2 en 20%. Resultan incrementos significativos, aunque la saturación final no se acerque al 100%. Sin embargo, durante el ensayo luego de dos horas y media, la presión se mantenía constante por lo que se puede concluir que las muestras no son capaces de incrementar más su saturación bajo las condiciones del ensayo.

La muestra de Azogues presenta la mayor presión de expansión de todas las muestras como se presenta en la Tabla 46.

Muestra	Presión expansión	Humedad Inicial	Saturación Inicial	Humedad Final	Saturación Final	Peso específico seco
Azogues	(kg/cm ²)	(%)	(%)	(%)	(%)	(gr/cm ³)
1	0.2915	12.41	75.19	17.58	106.5	1.88
2	0.298	13.06	73.82	17.03	96.25	1.84

Tabla 46. *Expansión Controlada Azogues.*

Valores iniciales de humedad y saturación son cercanos entre sí. El resultado promedio de presión de expansión de las dos muestras da un resultado de 0.2948 kg/cm². Se llega a valores de saturación alrededor del 100% por lo cual la muestra desarrolla su potencial expansivo completamente. Además, se tiene valores de densidad seca similares entre sí por lo que se podría decir que se trata de muestras comparables entre sí.

En la Tabla 47 se presenta el resumen de resultados del ensayo de expansión controlada. Se tiene el mayor valor de presión de expansión para la muestra de Azogues con 298 g/cm², caso contrario con la muestra de Valle se obtiene el menor valor de presión, con 13 g/cm².

Muestra	Presión expansión (g/cm ²)
Gapal	22.2
Valle	13
Challuabamba	95
Sidcay	19
Miraflores	71.3
Azogues	298

Tabla 47. Resultados expansión controlada.

4.2.4 Expansión Libre en probeta

Para el ensayo de probetas se toma el valor únicamente del volumen de la muestra de suelo mezclada previamente, tanto en agua destilada como en keroseno luego de 24 horas. Para la muestra con keroseno no se presentó ninguna variación en el volumen de la muestra, durante el tiempo de ensayo como se presenta en la Tabla 48.

	Volumen del suelo en agua destilada [cm ³]	Volumen del suelo en keroseno [cm ³]	% Expansión Suelo
Gapal	11	10	10
Valle	13	10	30
Challuabamba	11	10	10
Sidcay	12	10	20
Miraflores	15	10	50
Azogues	11	10	10

Tabla 48. Expansión Libre en Probeta.

Los resultados de expansión para todas las muestras son menores o iguales a 50, lo que da un resultado de expansión bajo y muy bajo según la Tabla 4 de clasificación según el grado de expansividad de expansión libre en probeta.

4.2.5 Aparato de Lambe

El ensayo exige que se aplique una carga inicial de 40 N, la cual se controla en el dial del aparato de Lambe. Se realizaron 6 ensayos, uno para cada tipo de suelo. Para la ejecución del ensayo se utilizó la ecuación del aparato de Lambe recuperada por Bravo y Daza (2019), la cual está en función de la carga y la lectura del dial, empleando la ecuación, los 40 N corresponden a 4 líneas del dial del aparato de Lambe.

Para la ejecución del ensayo se utilizó la muestra con una humedad correspondiente al límite plástico siguiendo el procedimiento para preparación de la muestra en la norma INV E 120-07. Se obtuvieron los resultados indicados en la Tabla 49.

Muestra	Gapal	Valle	Challuabamba	Sidcay	Miraflores	Azogues
Índice de hinchamiento (kg/cm ²)	0.33	0.24	0.73	0.11	0.79	0.21
Cambio de volumen potencial	Crítico	Marginal	Muy crítico	Marginal	Muy crítico	Marginal

Tabla 49. *Aparato de Lambe*

Para obtener el resultado del cambio volumétrico potencial se utiliza la Figura 11 de la sección de metodología, en el cual se ingresa con el valor del índice de hinchamiento en MPa y se sigue una línea horizontal hasta que coincida con la línea de la humedad del límite plástico.

Se obtiene resultados de expansión marginal para las muestras de Valle, Sidcay y Azogues lo cual es referente a un suelo de expansibilidad baja. Caso contrario para las muestras de Challuabamba y Miraflores con potenciales expansivos muy altos. Estos resultados se procederán a comparar posteriormente.

4.3 Correlaciones

En el empleo de las correlaciones se tienen varios autores que han propuesto diferentes ecuaciones, rango de parámetros y gráficas para clasificar un suelo según su potencial expansivo.

A continuación, se realiza una clasificación de resultados según el tipo de mineral predominante, grado de expansividad y finalmente valores de presión y porcentaje de expansión de todas las muestras con diferentes correlaciones para cada clasificación.

4.3.1 Tipo de mineral predominante

Varios autores tratan de aproximarse al tipo de mineral presente en el suelo según sus características/propiedades tales como: actividad, límites de Atterberg, gravedad específica.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por cuatro autores:

- Braja Das (2001) propone ciertos rangos de gravedad específica para poder clasificar el material como se presenta en la Tabla 6.
- Skempton (1953) utiliza únicamente el resultado de actividad del suelo para determinar el tipo de mineral dominante en el mismo.
- Seed, Woodward y Lundgren (1964), reduce el porcentaje de material menor a 0.002 mm en 10% cuando este resulta menor a 40%. Realiza esta variación con respecto a Skempton (1953) debido a que considera que la relación no presenta un comportamiento lineal inicialmente.

- Marín Nieto (1991) propone una gráfica para la clasificación según el mineral predominante como se presenta en la Figura 12.

En el Anexo 3 se presenta el desglose de los datos usados y los resultados obtenidos. A continuación, se presentan y comparan los resultados.

Autor	Braja Das	Skempton	Seed et al	Marín Nieto
Datos usados	Gs	Actividad	% menor 0.002 mm, Actividad	LL, LP
Gapal	Caolinita/ Montmorilonita	Illita	Esmectita	Caolinita
Valle	Caolinita	Illita	Esmectita	Caolinita
Challuabamba	Montmorilonita	Illita	Esmectita	Montmorilonita
Sidcay	Caolinita	Illita	Esmectita	Caolinita
Miraflores	Montmorilonita	Illita	Illita	Montmorilonita
Azogues	Montmorilonita	Esmectita	No clasifica	Caolinita

Tabla 50. *Tipo de mineral predominante.*

En la Tabla 50 se observa que existe una gran dispersión en los resultados obtenidos, para el primer caso por Braja Das (2001) se tienen minerales del tipo Caolinita y Montmorilonita. En el caso de Skempton (1953) y Seed (1964) se tiene discordancias entre sí, siendo del tipo Illita para todas las muestras exceptuando Azogues del tipo Esmectita (Montmorilonita), caso contrario para Seed siendo todos Esmectita y manteniéndose únicamente Illita para Miraflores.

Para las muestras de Challuabamba y Miraflores mediante la clasificación de Marín Nieto (1991) se obtiene un resultado de mineral tipo Montmorilonita, lo cual concuerda con los resultados obtenido en los límites de Atterberg con valores de límites líquidos elevados que resulta en un potencial expansivo alto, por lo tanto, indica que se puede deber a la presencia de minerales tipo Montmorilonita. Para las demás muestras se obtiene un mineral del tipo Caolinita con un menor porcentaje expansivo que el anterior. Se tiene una tendencia de esta clasificación con Braja Das (2001) variando únicamente para las muestras de Azogues Caolinita por Esmectita respectivamente.

Luego de realizar un análisis de los resultados obtenidos para todas las correlaciones resulta que el método de Marín Nieto (1991) muestra los resultados más coherentes según la clasificación del suelo por el tipo de mineral predominante como se presenta en la Tabla 51. En donde arcillas que contienen un alto contenido del mineral Montmorilonita presentan una plasticidad alta como se presentan los resultados en el método de la SUCS Tabla 30.

Las muestras que no presentan alta plasticidad realizando por la misma clasificación se tiene que el mineral predominante es la Caolinita, mineral el cual tiene características expansivas, pero en menor magnitud que la Montmorilonita.

Muestra	Mineral
	Marín Nieto
Gapal	Caolinita
Valle	Caolinita
Challuabamba	Montmorilonita
Sidcay	Caolinita
Miraflores	Montmorilonita
Azogues	Caolinita

Tabla 51. *Resumen mineral de arcilla.*

Cabe recalcar que los resultados de la Tabla 51 se obtienen en base del empleo de correlaciones y no mediante ensayos directos, por lo cual son resultados aproximados para los suelos en estudio.

4.3.2 Grado de expansividad

Para analizar el grado de expansividad se revisan nuevamente criterios emitidos por diferentes autores que comparan propiedades del suelo y las relacionan con el grado de expansión que éstas deberían tener.

Algunos autores consideran simplemente los límites de Atterberg, otras incluyen granulometría e inclusive resultados de ensayos de expansión:

- Holtz y Gibbs (1954) utilizan únicamente el índice de plasticidad, para llegar a aproximar un grado de expansividad cualitativo del suelo.
- Holtz y Gibbs (1954) realizaron otra clasificación con el límite de contracción.
- Holtz y Gibbs (1956) proponen una clasificación más completa que incluye a las dos anteriores además del contenido de coloides y porcentaje de expansión bajo carga. No se consideró este último parámetro para la realización de la clasificación, debido a que no se obtuvo este valor de porcentaje de expansión bajo carga.
- Holtz, Dakshanamurthy y Raman (1973) incluyen el límite líquido a las dos primeras clasificaciones realizadas por Holtz & Gibbs.
- Seed (1962) desarrolla una carta en función de la actividad y el porcentaje de finos la cual se apreció en la Figura 13.

Autor	Holtz & Gibbs	Holtz & Gibbs	Holtz & Gibbs	Holtz et al	Seed
Datos usados	IP	LC	IP, LC, <0.001 mm	IP, LC, LL	Actividad, <0.002 mm
Gapal	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Bajo
Valle	Medio	Bajo	Medio	Medio	Bajo
Challuabamba	Alto	Bajo	Muy Alto	Alto	Alto
Sidcay	Leve	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Miraflores	Muy Alto	Bajo	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
Azogues	Leve	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo

Tabla 52. Grado de expansividad.

Se tiene variación de resultados entre sí, siendo notable a primera vista los resultados de bajo para todas las muestras según la clasificación de Holtz y Gibbs en base del límite de contracción. Para los demás clasificaciones si se presenta una tendencia entre los diferentes suelos.

Otros autores consideran más características como resultados de ensayos de expansión, límites de Atterberg, Lambe, y porcentajes de material pasante por diferentes tamaños de tamices, mencionando los siguientes:

- Ortiz (1975)
- González de Vallejo (2002)
- Chen (1988)

Autor	Ortiz (1975)	González de Vallejo (2002)	Chen (1988)
Datos usados	LC, IP, LL, %Finos, %<0.001, Actividad, SP, Lambe, Ps	%Finos, LL, Lambe, Ps, SP	% Finos, LL, SP, Ps
Gapal	Medio	Baja – Medio	Alto
Valle	Medio	Medio	Medio – Alto
Challuabamba	Muy Alto	Alto – Muy Alta	Muy Alto – Alto
Sidcay	Bajo	Baja	Medio
Miraflores	Muy Alto	Alta – Muy Alta	Muy Alto
Azogues	Bajo	Alta	Muy Alto

Tabla 53. Grado de expansividad según autores que incluyen ensayos de expansión.

Según la Tabla 53 la clasificación por Ortiz (1975) utiliza el mayor número de parámetros en comparación de las otras dos. Los resultados de González de Vallejo (2002) presentan una semejanza de resultados a los obtenidos por Ortiz (1975), con la única diferencia de la muestra de Azogues que se clasifica con expansividad alta. La clasificación de Chen (1988) obtiene resultados de expansividad alto – muy alto para casi todas las muestras a excepción de la muestra de Sidcay de un valor Medio.

Según el grado de expansividad se realiza una clasificación cualitativa de las muestras. Para esta clasificación se cuenta con mayor bibliografía de autores que proponen diferentes parámetros para determinar el grado de expansividad como se presenta en la Tabla 54.

Muestra	Expansión libre en probeta	Lambe	Holtz y Gibbs (1954)	Holtz y Gibbs (1954)	Holtz y Gibbs (1956)	Holtz, et al. (1973)	Seed (1962)	Ortiz (1975)	González de Vallejo (2002)	Chen (1988)
Gapal	Muy Bajo	Alto	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Medio	Bajo-Medio	Alto
Valle	Bajo	Medio	Medio	Bajo	Medio	Medio	Bajo	Medio	Medio	Medio – Alto
Challua-bamba	Muy Bajo	Muy Alto	Alto	Bajo	Muy Alto	Alto	Alto	Muy Alto	Alto – Muy Alto	Muy Alto – Alto
Sidcay	Muy Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio
Mira-flores	Bajo	Muy Alto	Muy Alto	Bajo	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto	Alto – Muy Alto	Muy Alto
Azogues	Muy Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Muy Alto

Tabla 54. Resumen de resultados de grado expansividad.

Se realizó un resumen de grado de expansividad según los valores que más se repetían por todas las clasificaciones como se observa en la Tabla 55.

Muestra	Grado Expansividad
Gapal	Bajo - Medio
Valle	Medio
Challuabamba	Alto – Muy Alto
Sidcay	Bajo
Miraflores	Muy Alto
Azogues	Bajo

Tabla 55. Resumen resultados de grado expansividad.

Las clasificaciones que concuerdan con el resumen final de resultados se presentan en la Tabla 56. Cabe recalcar que la realizada por González de Vallejo (2002) concuerda para todas las muestras exceptuando la muestra de Azogues en la cual se tiene un valor de alto en lugar de bajo.

Muestra	Holtz y Gibbs (1954)	Holtz y Gibbs (1956)	Holtz, et al. (1973)	Ortiz (1975)	González de Vallejo (2002)
Gapal	Medio	Medio	Bajo	Medio	Bajo-Medio
Valle	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
Challuabamba	Alto	Muy Alto	Alto	Muy Alto	Alto – Muy Alto
Sidcay	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Miraflores	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto	Alto – Muy Alto
Azogues	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto

Tabla 56. Bibliografía que concuerda con los resultados de grado de expansividad final.

4.3.3 Porcentaje y presión de expansividad.

Se tienen ecuaciones que se encuentran en función de varios parámetros para la obtención de valores de porcentaje y presión de expansión de una manera indirecta. Estas ecuaciones han sido obtenidas durante la realización de varios estudios con diferentes tipos de muestras, por lo cual se espera que se ajuste de una manera cercana, pero no necesariamente exacta a los resultados obtenidos mediante los ensayos para la obtención de valores directos como de expansión libre y controlada realizados en este estudio.

- Seed (1962)

La expresión se encuentra en función únicamente del índice de plasticidad. Se obtienen los resultados de la Tabla 57.

Muestra	Porcentaje de expansión (%)
Gapal	2.147
Valle	2.729
Challuabamba	19.675
Sidcay	0.830
Miraflores	49.308
Azogues	0.976

Tabla 57. *Porcentaje de expansión Seed (1962).*

El resultado para el porcentaje de expansión se tiene que la mayor es la muestra de Miraflores con un 49% y la menor Azogues cerca del 1%. Esta correlación se encuentra en función del índice de plasticidad, por lo cual, a un mayor valor de índice de plasticidad se obtendrá un valor mayor de porcentaje de expansión.

- Komornik y David (1969)

La expresión se encuentra en función del límite líquido, peso específico y la humedad natural, obteniéndose los resultados de la Tabla 58.

Muestra	Presión de expansión [kg/cm ²]
Gapal	0.527
Valle	0.557
Challuabamba	0.560
Sidcay	0.490
Miraflores	0.656
Azogues	0.615

Tabla 58. *Presión de expansión, Komornik y David (1969).*

Se obtuvieron valores alrededor de 0.5 a 0.65 kg/cm² para las muestras utilizando la expresión propuesta por Komornik y David (1969), la cual se encuentra en función de la humedad natural, factor el cual varía en un rango amplio dependiendo de las condiciones atmosféricas a las que haya estado expuesta la muestra antes de su muestreo.

- Vijayvergiya y Ghazzaly (1973)

La expresión se encuentra en función del límite líquido y la humedad natural. Se obtienen los resultados de la Tabla 59.

Muestra	Porcentaje de expansión (%)
Gapal	-0.407
Valle	0.189
Challuabamba	-0.190
Sidcay	-
Miraflores	0.396
Azogues	0.089

Tabla 59. *Porcentaje de expansión, Vijayvergiya y Ghazzaly (1973).*

Se obtuvieron resultados sin sentido alguno para la mitad de las muestras como se presenta en la Tabla 59. Esto se debe a que la expresión propuesta por Vijayvergiya y Ghazzaly (1973) se encuentra en base de la humedad natural la cual varía en un amplio rango de valores como se mencionó en la expresión de Komornik y David (1969) anteriormente, resultando en valores cercanos a cero inclusive negativos.

- Nayak y Christensen (1979)

La expresión se encuentra en función del índice de plasticidad, contenido de arcilla y la humedad natural, obteniéndose los resultados de la Tabla 60.

Muestra	Porcentaje de expansión (%)
Gapal	1.044
Valle	2.321
Challuabamba	5.851
Sidcay	0.366
Miraflores	26.021
Azogues	0.387

Tabla 60. *Porcentaje de expansión Nayak y Christensen (1979).*

Para las expresiones de Nayak y Christensen (1979) se calcularon valores de presión de expansión con mayor variación, siendo elevado para la muestra de Miraflores. El valor elevado de Miraflores se debe a que la expresión está en función

de cantidad de partículas inferiores a 2 micras y para esta muestra se cuenta con un valor mayor al 60%, además de que la expresión se encuentra en función de la humedad.

- Schneider y Poor (1974)

La expresión se encuentra en función de los mismos parámetros que de la expresión anterior. Se obtienen los resultados de la Tabla 61.

Muestra	Presión de expansión (kg/cm ²)	Porcentaje de expansión (%)
Gapal	0.864	-0.057
Valle	8.153	0.577
Challuabamba	4.689	0.189
Sidcay	0.206	-0.256
Miraflores	62.164	0.615
Azogues	0.269	0.006

Tabla 61. Presión de expansión y porcentaje de expansión Schneider y Poor (1974).

Los resultados de presión de expansión presentados en la Tabla 61 varían en un rango de valores de 62 hasta los 0.2 kg/cm² para todas las muestras. La ecuación para el cálculo de la presión de expansión se encuentra en función de contenido de coloides siendo la muestra de Miraflores la que mayor valor presenta con respecto a este parámetro. Además, del empleo de la humedad la cual varía dependiendo la época del año que se realice el muestreo.

Para los resultados del porcentaje de expansión se tiene valores negativos para las muestras de Gapal y Sidcay esto debido a que la expresión de cálculo está en función de la humedad, la cual varía significativamente según la época a la cual se extraiga el material.

- Chen (1988)

La expresión se encuentra en función únicamente del índice de plasticidad. Se obtienen los resultados de la Tabla 62.

Muestra	Porcentaje de expansión (%)
Gapal	1.056
Valle	1.223
Challuabamba	8.602
Sidcay	0.668
Miraflores	42.920
Azogues	0.714

Tabla 62. Porcentaje de expansión Chen (1988).

La expresión para el cálculo del porcentaje de expansión de Chen (1988) es similar a la propuesta por Seed (1962) ya que únicamente interviene el factor del índice de plasticidad, en este caso el parámetro es elevado al número e multiplicado por un factor. Se obtiene el mayor resultado para la muestra de Miraflores y el menor para la muestra de Azogues.

- Basma (1996)

La expresión se encuentra en función del índice de plasticidad y el contenido de arcilla, obteniéndose los resultados de la Tabla 63.

Muestra	Porcentaje de expansión (%)
Gapal	0.027
Valle	0.040
Challuabamba	0.137
Sidcay	0.016
Miraflores	0.179
Azogues	0.035

Tabla 63. *Porcentaje de expansión Basma (1996).*

Los resultados de porcentaje de expansión de Basma (1996) son los más bajos en comparación con las otras correlaciones, siendo estas en su totalidad inferiores al 1%. Las muestras de Miraflores y Challuabamba presentan los mayores valores de porcentaje de expansión, Sidcay presenta el menor valor.

- Erguler y Ulusay (2003)

La expresión se encuentra en función de la humedad natural, límite líquido y peso específico. Se obtienen los resultados de la Tabla 64.

Muestra	Presión de expansión (kg/cm ²)
Gapal	-0.293
Valle	-0.720
Challuabamba	0.207
Sidcay	-0.422
Miraflores	0.454
Azogues	0.157

Tabla 64. *Presión de expansión Erguler y Ulusay (2003).*

Se obtuvieron resultados negativos para las muestras como se presenta en la Tabla 64, caso similar a los obtenidos por Vijayvergiya y Ghazzaly (1973). Esta correlación se encuentra en base de la humedad, límite líquido y el peso específico seco. Los resultados resultan valores cercanos a cero inclusive negativos.

- Sabtan (2005)

La expresión se encuentra en función del contenido de arcilla, índice de plasticidad y la humedad natural, obteniéndose los resultados de la Tabla 65.

Muestra	Porcentaje de expansión (%)	Presión de expansión (Kg/cm ²)
Gapal	2.030	0.176
Valle	2.831	0.204
Challuabamba	4.156	0.250
Sidcay	1.230	0.148
Miraflores	7.462	0.364
Azogues	1.505	0.158

Tabla 65. Porcentaje de expansión y presión de expansión Sabtan (2005).

Los resultados de porcentaje de expansión presentados en la Tabla 65 indican un mayor valor para la muestra de Miraflores alrededor del 7% y la menor de Sidcay poco más del 1%. Mediante la expresión para el cálculo de la presión de expansión de Sabtan (2005) se obtuvieron valores positivos para todas las muestras, teniendo una pequeña variación entre sí. Siendo la de mayor valor la muestra de Miraflores y menor la de Sidcay.

- Resultados porcentaje de expansión.

Las correlaciones empleadas para la obtención del porcentaje de expansión indirectamente presentan resultados que no aplican a los suelos estudiados, los criterios de Vijayvergiya y Ghazzaly (1973), Schneider y Poor (1974) dan inclusive resultados negativos, como se presenta en la Tabla 66.

Muestra	Expansión Libre %	Seed (1962)	Vijayvergiya y Ghazzaly (1973)	Nayak y Christensen (1979)	Schneider y Poor (1974)	Chen (1988)	Basma (1996)	Sabtan (2005)
Gapal	1.043	2.15	-0.41	1.04	-0.06	1.06	0.027	2.03
Valle	0.483	2.73	0.19	2.32	0.58	1.22	0.040	2.83
Challuabamba	2.626	19.68	-0.19	5.85	0.19	8.60	0.137	4.16
Sidcay	0.936	0.83	-	0.37	-0.26	0.67	0.016	1.23
Miraflores	3.078	49.31	0.40	26.02	0.62	42.92	0.179	7.46
Azogues	2.286	0.98	0.09	0.39	0.01	0.71	0.035	1.51

Tabla 66. Resumen porcentaje de expansión.

Los parámetros que influyen en el cálculo del porcentaje de expansión son: el índice de plasticidad, límite líquido, contenido de arcilla y humedad natural. Siendo este último un parámetro que puede variar en un rango extenso dependiendo de la época del año de la toma de muestras, esto influye en el resultado del empleo de las ecuaciones.

Para la muestra de Miraflores que presenta el mayor porcentaje de expansión libre, se tiene una sobreestimación exagerada con el empleo de las correlaciones de Seed (1962), Nayak y Christensen (1979) y Chen (1988) siendo más de 15 veces la obtenida en el ensayo.

En la Tabla 67 se presenta el error obtenido mediante el empleo de las correlaciones con respecto al valor obtenido en el ensayo de expansión libre. Se tiene un porcentaje excesivo de error con el empleo de la correlación de Seed (1962), Nayak y Christensen (1979) y Chen (1979) en el caso de la muestra de Miraflores. La que menor error presenta para esta muestra es la propuesta por Schneider y Poor (1974).

Muestra	Seed	Vijayvergiya y Ghazzaly	Nayak y Christensen	Schneider y Poor	Chen	Basma	Sabtan
Gapal	-105.81	138.98	-0.06	105.50	-1.25	97.44	-94.65
Valle	-465.07	60.79	-380.49	-19.47	-153.18	91.67	-486.05
Challuabamba	649.25	107.23	-122.81	92.79	-227.59	94.77	-58.26
Sidcay	11.37	-	60.93	127.36	28.60	98.33	-31.45
Miraflores	-1501.94	87.14	-745.38	80.03	-1294.41	94.18	-142.43
Azogues	57.30	96.10	83.09	99.73	68.76	94.49	34.16

Tabla 67. Errores de las correlaciones con respecto al porcentaje de expansión libre.

La correlación propuesta por Basma (1996) da como resultado un error más uniforme alrededor del 90 al 100% de todas las muestras. Caso contrario de las otras que se obtiene errores casi nulos a errores de hasta 1500% caso Seed (1962) muestra Miraflores.

- Resultados presión de expansión.

Dentro del presente estudio se obtiene la presión de expansión para los suelos en análisis, a través de dos ensayos: expansión controlada y ensayo Lambe; además, se utilizan correlaciones empíricas para determinar esta presión de expansión, los parámetros que influyen en el cálculo de la presión de expansión son: el índice de plasticidad, límite líquido, contenido de arcilla, humedad natural, peso específico.

En las correlaciones empleadas para la obtención de presión de expansión se tienen resultados casi sin ninguna variación para el caso de Komornik y David (1969) entre sí, es decir todos los suelos exhiben una presión muy similar según este método. Caso contrario los resultados que presentan Schneider y Poor (1974) varían de 0.2 hasta más de 60 kg/cm² como se presentan en la Tabla 68.

Muestra	Expansión Controlada kg/cm ²	Lambe kg/cm ²	Komornik y David kg/cm ²	Schneider y Poor kg/cm ²	Erguler y Ulusay kg/cm ²	Sabtan kg/cm ²
Gapal	0.0222	0.033	0.527	0.864	-0.293	0.176
Valle	0.013	0.024	0.557	8.153	-0.72	0.204
Challuabamba	0.095	0.073	0.560	4.689	0.207	0.25
Sidcay	0.019	0.011	0.490	0.206	-0.422	0.148
Miraflores	0.0713	0.079	0.656	62.16	0.454	0.364
Azogues	0.298	0.021	0.615	0.27	0.157	0.158

Tabla 68. Resumen resultados de presión de expansión.

En el caso de la comparación entre el ensayo de Expansión Controlada y Lambe se tiene valores cercanos entre sí, con la diferencia que en el ensayo de Lambe se utiliza una carga constante la cual no varía en el tiempo, teniendo su propia forma de clasificación para los resultados obtenidos en el ensayo.

La correlación de Erguler y Ulusay (2003) presenta valores negativos para la mitad de las muestras, lo cual es errado, esta estimación tiene una correspondencia real. Los resultados obtenidos por Sabtan (2005) presentan valores inferiores al 1 kg/cm² siendo estos valores uniformes entre sí.

Se tiene un error excesivo para todas las correlaciones para el cálculo de presión de expansión como se presenta en la Tabla 69. Se puede destacar que para la muestra de Azogues se presenta el menor porcentaje de error de todas las correlaciones. Se sugiere realizar el ensayo de expansión controlada para la obtención de la presión de expansión y no el empleo de las correlaciones de cuantificación.

Muestra	Komornik y David	Schneider y Poor	Erguler y Ulusay	Sabtan
Gapal	-2361.88	-3938.63	1468.21	-722.26
Valle	-4181.51	-62614.17	5638.18	-1466.82
Challuabamba	-509.41	-5002.46	125.66	-171.59
Sidcay	-2589.61	-1031.68	2419.68	-714.62
Miraflores	-863.47	-91183.91	566.25	-434.66
Azogues	-108.50	8.77	46.58	46.48

Tabla 69. Errores de las correlaciones con respecto a la expansión controlada.

4.4 Resumen resultados finales

Se propone la Tabla 70 de clasificación para el grado de expansividad, según los resultados obtenidos en los ensayos de expansión libre (Tabla 40) y controlada (Tabla 47), siendo estos dos valores obtenidos de manera directa de la muestra; es decir, de los ensayos realizados en el presente trabajo se puede desprender la relación mostrada en la Tabla 70.

Se realiza esta clasificación con la finalidad de dar una categorización acertada a los resultados obtenidos en laboratorio para la muestra de Azogues, esto debido a que en el resumen de resultados según el grado de expansividad final se cataloga a esta de potencial expansivo bajo; se considera esta clasificación errónea ya que esta muestra presenta el mayor valor de presión de expansión Tabla 47 y el tercer porcentaje de expansión libre mayor Tabla 40.

Grado Expansividad	Índice Expansión Libre	Expansión Controlada
		g/cm ²
Bajo	0-10	0-20
Medio	10-15	20-50
Alto	15-20	50-70
Muy Alto	>20	>70

Tabla 70. Clasificación grado de expansividad según expansión libre y expansión controlada.

Se presenta un resumen de resultados para el tipo de suelo, mineral de arcilla, porcentaje de expansión, presión de expansión y grado de expansividad para las diferentes muestras posterior a una comparación de lo obtenido mediante ensayos de expansividad como en el empleo de las correlaciones en la Tabla 71.

Se proponen como resultados finales la Tabla 71 donde las muestras de Challuabamba, Miraflores y Azogues presentan un grado de expansividad muy alto teniendo un riesgo de igual magnitud. Para la muestra de Gapal se tiene un potencial expansivo medio y para las muestras de Valle y Sidcay un potencial expansivo bajo siendo estos los de menor problemática.

Muestra	Tipo de Suelo	Mineral predominante	Expansión Libre IE	Expansión Controlada Kg/cm ²	Grado Expansividad
	SUCS				
Gapal	CL Arcilla Baja Plasticidad	Caolinita	10.43	0.0222	Medio
Valle	SC Arena Arcillosa	Caolinita	4.83	0.013	Bajo
Challuabamba	CH Arcilla Alta Plasticidad	Montmorilonita	26.26	0.095	Muy Alto
Sidcay	SC Arena Arcillosa	Caolinita	9.36	0.019	Bajo
Miraflores	CH Arcilla Alta Plasticidad	Montmorilonita	30.78	0.0713	Muy Alto
Azogues	SC Arena Arcillosa	Montmorilonita	22.86	0.298	Muy Alto

Tabla 71. Resultado final de valores de expansividad.

Para una clasificación de grado de expansividad según los resultados finales obtenidos, la propuesta por González de Vallejo (2002) Tabla 13 se ajusta para todas las muestras exceptuando para la muestra de Valle, obteniéndose una

clasificación media, considerando este resultado algo conservador con respecto al resultado obtenido de bajo. En el empleo de las otras clasificaciones del mismo parámetro existen discrepancias para todos los casos por lo cual no se recomienda el empleo de las mismas.

4.5 Correlación entre ensayos de expansión

A continuación, se realizan gráficas de correlación de los resultados del ensayo de expansión libre versus los resultados de los otros ensayos de expansión, con el objeto de contrastarlos y observar si existe una relación o tendencia entre sí.

Para la Figura 22 en donde se compara el ensayo de expansión libre versus expansión controlada, se obtiene como resultado un coeficiente de determinación (R^2) de 0.2562, lo cual indica que no existe una buena relación lineal entre estos dos ensayos para todas las muestras.

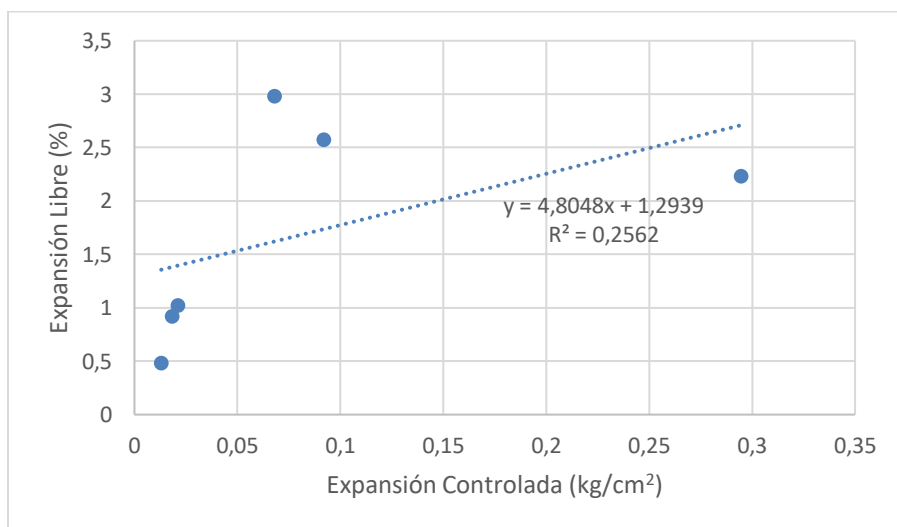


Figura 22. *Expansión Libre vs Expansión Controlada.*

En la Figura 23 se presenta la comparación de los resultados entre el ensayo de expansión libre y aparato de Lambe; a pesar de que el coeficiente de determinación es mayor a comparación del caso anterior (0.6185), no muestra una buena relación de los resultados entre sí.

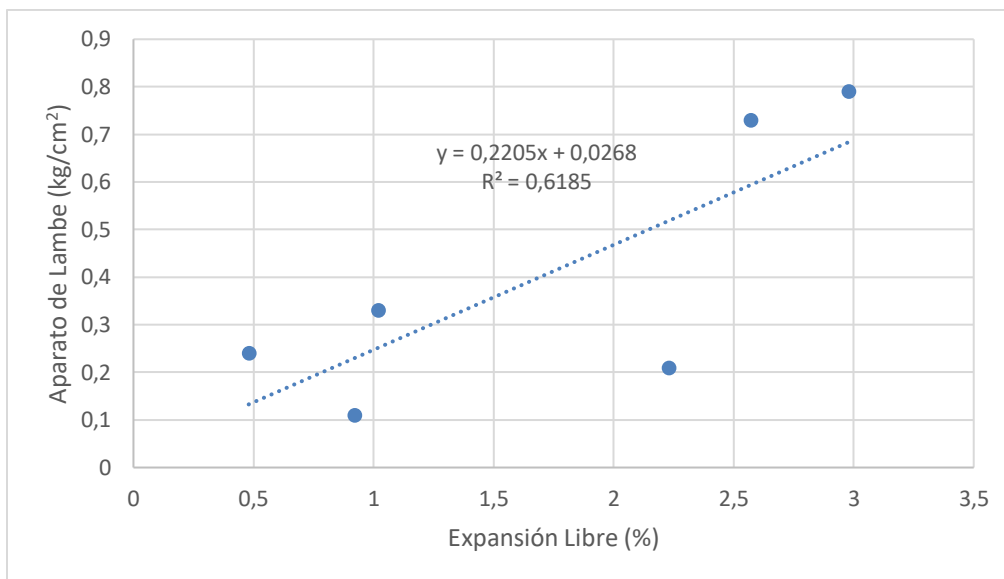


Figura 23. *Expansión Libre vs Aparato de Lambe*

La relación entre los resultados del ensayo de expansión libre versus expansión libre en probeta presenta el coeficiente de determinación más bajo inclusive, con un valor de 0.0537 como se aprecia en la Figura 24.

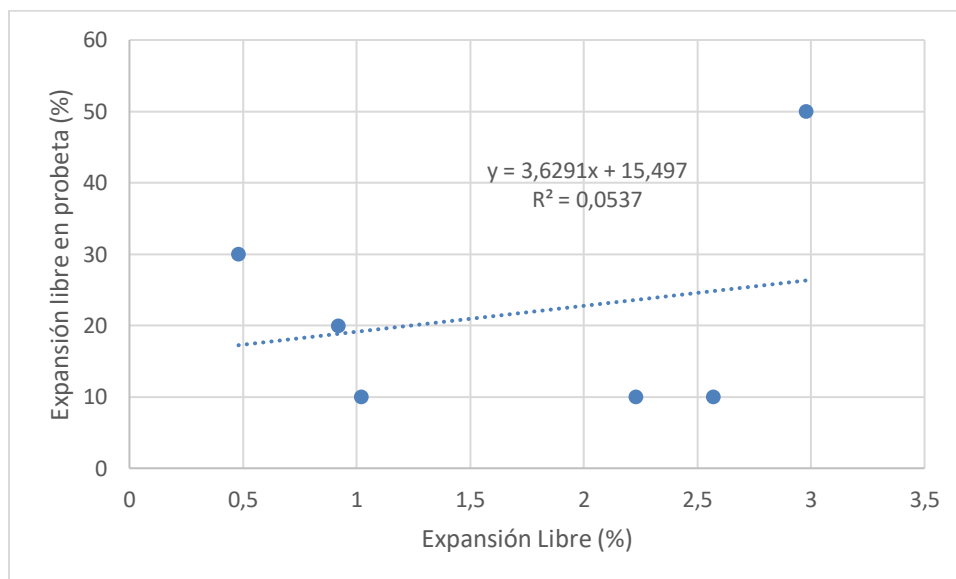


Figura 24. *Expansión Libre vs Expansión Libre en probeta*

De igual forma como se relacionaron los resultados del ensayo de expansión libre con respecto a los otros resultados de ensayos de expansión, se procede a realizar la comparación para el ensayo de expansión controlada, con la finalidad de observar una tendencia de los resultados entre sí.

En la Figura 25 de comparación de los resultados de expansión controlada vs aparato de Lambe se tiene un coeficiente de correlación cercano a cero, lo cual no presenta ninguna relación de los resultados entre sí.

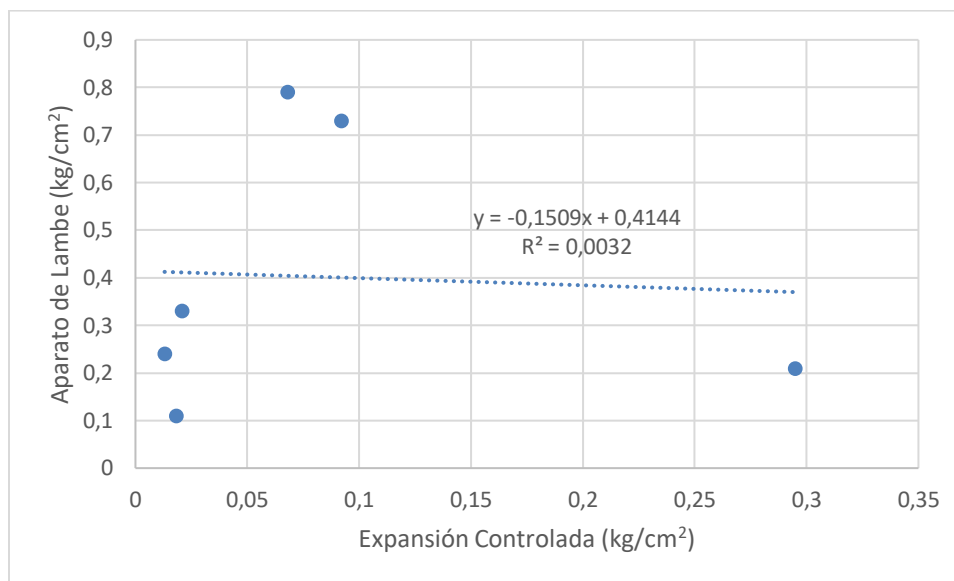


Figura 25. *Expansión Controlada vs Aparato de Lambe*

Se tiene un coeficiente de determinación de 0.1015 en el caso de comparación entre los resultados de expansión controlada versus expansión libre en probeta como se presenta en la Figura 26.

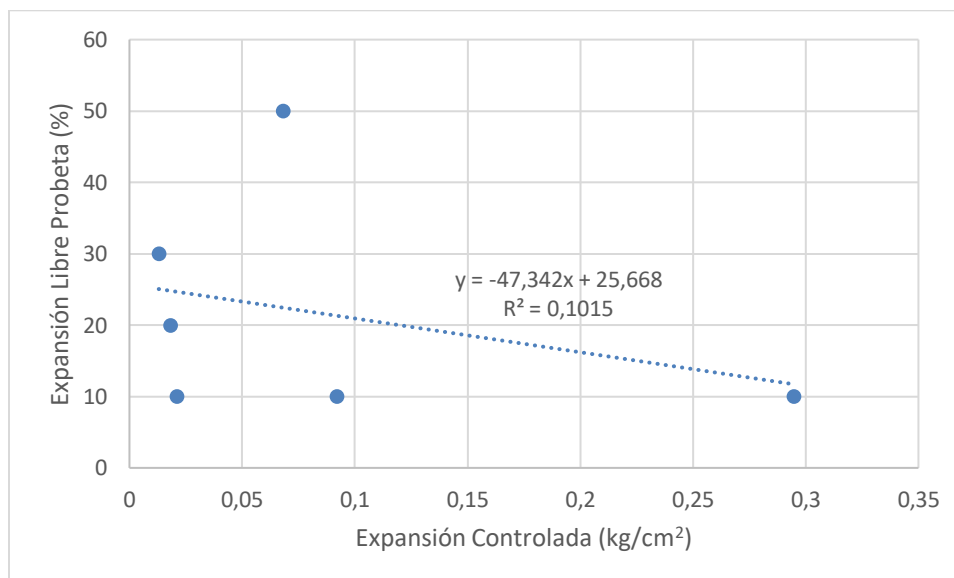


Figura 26. *Expansión Controlada vs Expansión Libre en probeta*

Se obtienen coeficientes de determinación (R^2) para todos los gráficos de comparación de resultados de expansión libre, controlada versus los otros resultados de ensayos de expansión alejados de 1, siendo este valor o cercanos a este (hasta 0.9) donde se considera una buena relación de los resultados entre sí.

Así como se utilizaron relaciones lineales para realizar una comparación de los resultados de los ensayos de expansión entre sí, se realizó a su vez de manera exponencial y polinómica. Se obtuvo el mayor valor coeficiente de determinación de 0.6377 en el caso de los resultados de expansión controlada vs expansión libre (Ver Anexo 4) para el ajuste exponencial. En el caso del ajuste polinómico el mayor valor del coeficiente de determinación se presentó para la misma comparación de ensayos del ajuste exponencial con un valor de 0.9034 (Ver Anexo 4), siendo de cierta manera un valor aceptable de este parámetro con la contradicción de la forma que esta presenta (parabólica), ya que se esperaría que presente una tendencia lineal, además de que se debería realizar un análisis real físico para buscar una relación de este estilo.

Además, se realizó un análisis gráfico a continuación con la eliminación de la muestra de Azogues en la que se obtuvieron valores fuera de tendencia de las demás muestras como se presencia en la comparación de los resultados de los ensayos Figuras 22, 23 y 25.

En la Figura 27 se presenta la comparación de los resultados entre los ensayos de expansión libre vs expansión controlada con un valor de coeficiente de 0.858, para el cual previamente se tenía un valor de 0.2562 (Figura 22) aumentando notablemente. Además de que ahora presenta una tendencia de crecimiento, como era de esperarse.

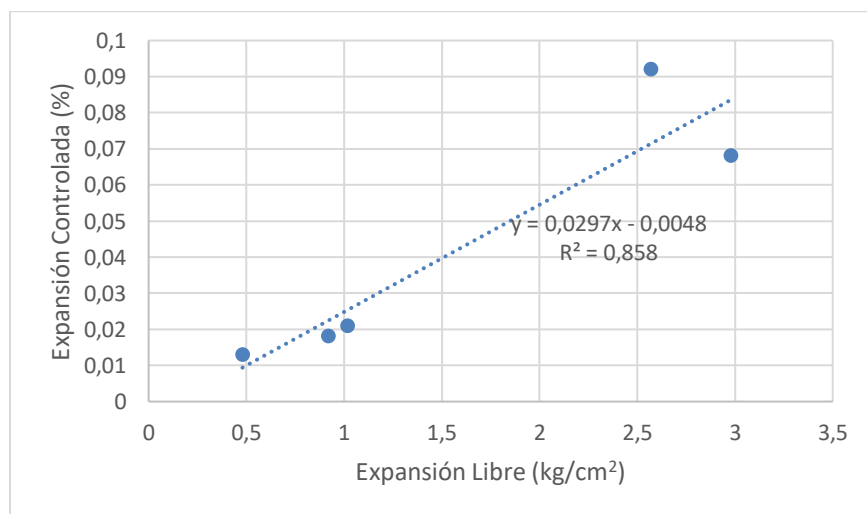


Figura 27. *Expansión Libre vs Expansión Controlada*

El valor de coeficiente de determinación de igual forma aumenta a 0.9049 como se presenta en la Figura 28 de comparación del ensayo de aparato de Lambe y expansión libre siendo antes este valor de 0.6185 como se presentó en la Figura 23. Presenta de igual forma la misma tendencia que en la comparación anterior de manera creciente.

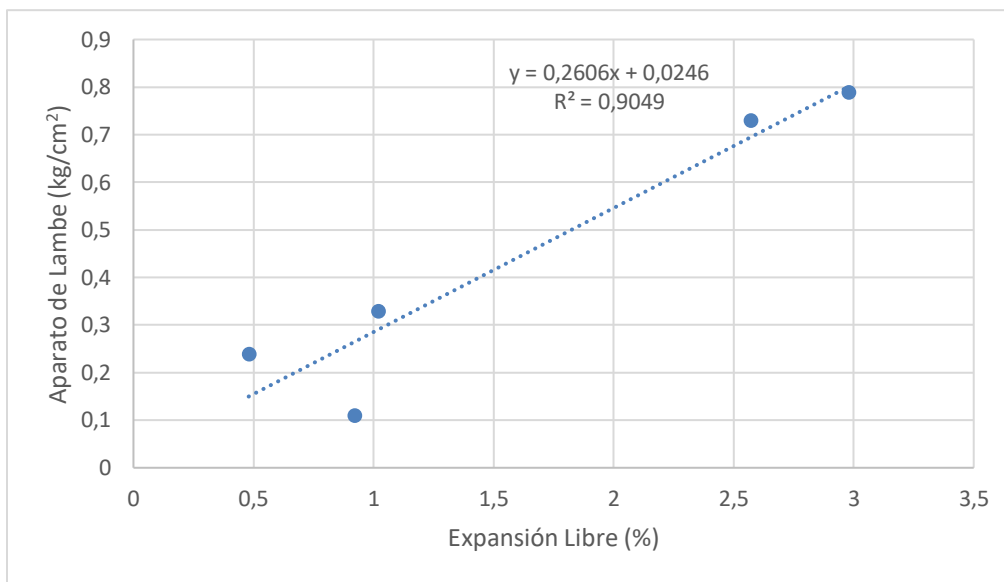


Figura 28. *Expansión Libre vs Aparato de Lambe*

De igual forma para la comparación de resultados de los ensayos de expansión controlada vs aparato de Lambe se tiene el mayor aumento de este parámetro a 0.8483 Figura 29, teniendo antes un valor de 0.0032. Se tiene una relación de los resultados de cierta manera entre sí comparado a lo que se tenía previamente.

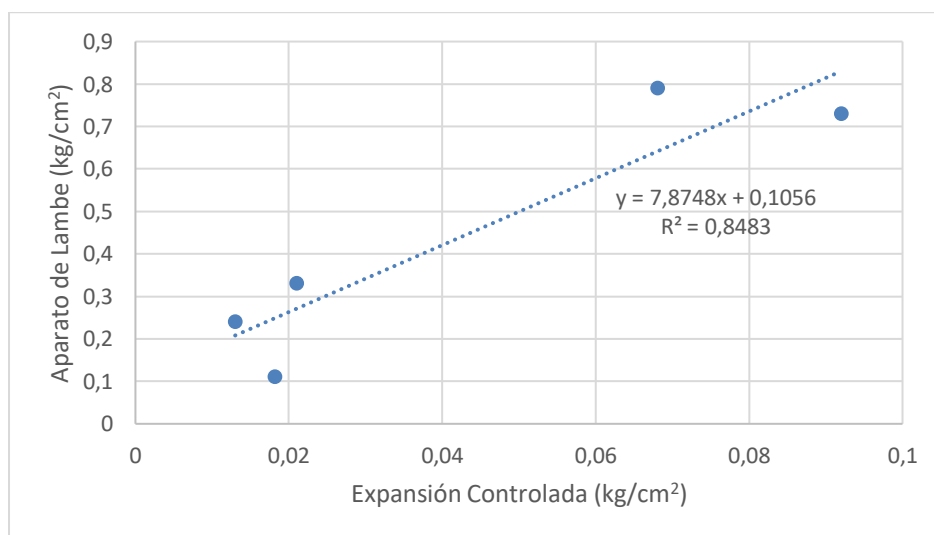


Figura 29. *Expansión Controlada vs Aparato de Lambe*



En el caso de comparación de los resultados de los ensayos de expansión controlada y libre con respecto al ensayo de expansión libre en probeta se tiene una ligera mejora la cual no es significativa y no se procede a detallar.

4.6 Recomendaciones de ensayos y correlaciones.

Después de obtener los diferentes resultados tanto de caracterización, expansión y correlaciones, en esta sección se procede a dar recomendaciones para la realización de los diferentes ensayos y el empleo de las correlaciones para realizar una caracterización adecuada de arcillas expansivas.

Dentro de los ensayos de caracterización se determinó granulometría, hidrómetro y gravedad específica de la fase sólida.

La granulometría es importante para conocer la cantidad de finos que presenta una muestra, siendo siempre necesario que esta se encuentre complementada con el ensayo de hidrómetro, que realiza una separación del material fino entre arcilla y limos presentes en la muestra. Estos dos ensayos nos ayudan a la obtención de la cantidad de arcilla, mas no proporcionan valores de presión o porcentaje de expansión.

El ensayo de gravedad específica de la fase sólida es necesario cuando se tiene planeado la realización del ensayo de hidrómetro, expansión controlada o expansión libre, ya que ciertas variables de estos ensayos para su cálculo se encuentran en función de este parámetro.

Dentro de los ensayos de expansión se realizó límites de Atterberg, expansión libre, expansión controlada, expansión libre en probeta y aparato de Lambe.

Los resultados de límites de Atterberg como límite líquido, límite plástico, límite de contracción son empleados en la mayoría de correlaciones para caracterizar un suelo como expansivo o asignar valores. Estos resultados se obtienen de una manera más rápida que los ensayos de expansión libre y controlada; sin embargo, se ha notado que muchas de las correlaciones y métodos empíricos que utilizan estos datos para aproximar un carácter expansivo del suelo, no aplican para los materiales analizados en el presente trabajo; por lo que, la utilidad de aplicar correlaciones basadas en límites de consistencia debería analizarse con precaución.

El ensayo de expansión libre da valores directamente de porcentaje de expansión de la muestra sin intervención de otros parámetros, a excepción de la gravedad específica de la fase sólida. Este parámetro se emplea para el cálculo de valores secundarios del ensayo, tales como porcentaje de vacíos y saturación, los cuales



dan una idea de cómo se comportó la muestra antes y al final del ensayo, pero no influyen en el valor del porcentaje de expansión.

El ensayo de expansión controlada de igual forma que el ensayo de expansión libre da resultados directos de expansión, siendo en este caso de presión. De igual forma en este ensayo interviene la gravedad específica para el mismo cálculo de valores secundarios que se mencionó anteriormente, que no tiene ninguna repercusión en el valor obtenido de presión de expansión.

Los resultados obtenidos en el ensayo de expansión libre en probeta se obtienen de una manera más sencilla. Para este ensayo no se tiene una clasificación propia de resultados de expansión, o diferentes rangos para su clasificación según su grado de expansividad, por lo cual no se puede validar los resultados obtenidos en este ensayo, finalmente no se recomendaría la elaboración de este ensayo.

En el aparato de Lambe se tiene como resultado una caracterización según su grado de expansividad. La muestra utilizada en el ensayo es del tipo remoldeada y preparada a una humedad que se seleccione según la norma, además de la aplicación de una energía de compactación por un martillo Proctor lo cual hace que pierda sus propiedades internas o estructura natural a la que muestra se encontraba en campo.

Con la finalidad de catalogar y obtener valores característicos de un suelo expansivo se procede al empleo de correlaciones. En el caso de estudio se dividió en tres según el tipo de mineral predominante, grado de expansividad y cuantificación.

En el caso del empleo de correlaciones, según el tipo de mineral se desprendieron una amplia variedad de resultados, los cuales de cierta manera no se los comprobó mediante un ensayo, pero si se presentó un resultado aproximado, según la coincidencia de algunos autores. El autor que se elegiría como mejor aproximación es González de Vallejo (2002).

Las correlaciones para clasificar según el grado expansividad de igual manera que del tipo de mineral tiene varios resultados en función de diferentes parámetros. El autor que mejor se aproxima es Holtz y Gibbs (1954) específicamente la que se encuentra únicamente en función del índice de plasticidad, siendo esta de rápida determinación al necesitar únicamente de ensayos de límite líquido y plástico. El resultado de esta clasificación tiene relevancia ya que según su grado de expansividad clasificado se puede decidir si se debe profundizar los resultados mediante la realización de ensayos de expansión libre y controlada para cuantificar estos valores exactos, previos al inicio de la construcción de alguna obra civil.



Para el caso de las correlaciones de cuantificación tanto de porcentaje y presión de expansión no se obtuvieron buenos resultados, por lo cual no se recomienda el empleo de correlaciones, se recomienda realizar ensayos directos para suelos locales.



5. CONCLUSIONES

El presente trabajo tiene como finalidad la caracterización de suelos expansivos dentro de la ciudad de Cuenca asignando valores y catalogándolos según sus características expansivas. Además de la comprobación de los resultados obtenidos en los ensayos de expansibilidad con correlaciones.

Se estudiaron cinco suelos naturales presentes en la ciudad de Cuenca y Azogues, los suelos estudiados se ubican en los sectores de Gapal, Valle, Challuabamba, Sidcay y Miraflores en la ciudad de Cuenca e ingreso Azogues carretera panamericana en la ciudad de Azogues. Geológicamente pertenecen a las formaciones de Mangán, Loyola, Loyola, Azogues, arcillas Varvadas en la ciudad de Cuenca respectivamente y Bentonita en Azogues.

De los suelos estudiados, se realizó una caracterización y un estudio de su grado de expansión. Dentro de la caracterización, la cantidad de finos resultó mayor al 80% para los suelos de Miraflores y Challuabamba, la muestra de Gapal presentó un porcentaje cercano al 60%. Las otras tres muestras presentan porcentajes de finos menores.

El grado expansivo de un suelo está íntimamente relacionado a su contenido de arcilla, por esta razón se procedió con la realización del ensayo de hidrómetro obteniendo resultados de: 61.12% de partículas tamaño arcilla para la muestra de Miraflores siendo la que presenta una mayor cantidad de arcilla, seguido por Challuabamba con un 36.25%, luego Gapal y Valle en ese orden con un alrededor del 20%. Sidcay y Azogues presentan los valores más bajos cercanos al 10%.

La clasificación de suelo por AASHTO da como resultado suelos arcillosos para todas las muestras exceptuando Azogues, siendo clasificada como una grava arcillosa, esto debido al bajo porcentaje de finos que presento la muestra cómo se mencionó anteriormente.

Por la clasificación por la SUCS se obtiene para las muestras de Gapal arcilla de baja plasticidad. Valle, Sidcay y Azogues como arenas arcillosas. Challuabamba y Miraflores como arcillas de alta plasticidad. Siendo en su mayoría arenas ya que el porcentaje de finos retenido sobre el tamiz 200 es mayor al 50%.

Para obtener el límite líquido de los suelos, se procedió a utilizar dos métodos. El método de Casagrande y el de penetración en cono, para lo cual mediante este segundo método se obtuvo una sobrestimación del valor del límite líquido alrededor de un 2 a 10% para casi la totalidad de las muestras, exceptuando para la muestra de Challuabamba que se obtuvo una subestimación cercana al 6%.



Se tienen valores altos para las muestras de Challuabamba y Miraflores con respecto al límite líquido y el índice de plasticidad a comparación de las demás muestras. De igual forma presentado estos dos suelos el mayor porcentaje de finos obtenidos del ensayo de granulometría.

Los resultados de expansión libre presentan índices de expansión inferiores a 10 para las muestras de Gapal, Sidcay y Valle, siendo esta última de menor valor. Al contrario, las muestras de Challuabamba y Azogues presentan valores superiores a 20. Siendo la que presenta mayor índice de expansión la muestra de Miraflores con casi 30.

Se tiene el mayor valor de expansión controlada para la muestra de Azogues con un valor promedio de 0.295 kg/cm^2 . Todas las demás muestras tienen valores inferiores a 0.1 kg/cm^2 , siendo la menor, la muestra de Valle con 0.013 kg/cm^2 de igual forma con el índice de plasticidad más bajo.

Los resultados de expansión libre en probeta según su caracterización dieron como resultado muestras con un grado de expansividad bajo y muy bajo, lo cual no concuerda con los resultados posteriormente obtenidos. Se considera que el ensayo no es útil para aproximar el real comportamiento de los suelos estudiados.

Para los resultados en los ensayos de expansión libre se observa que el hinchamiento se desarrolla casi en su totalidad dentro de las primeras 3 horas del ensayo, presentando además un gradiente alto, el cual se reduce progresivamente.

El aparato de Lambe presenta resultados de grado de expansividad del suelo, mediante un método gráfico; además, este ensayo da valores de presión de expansión; sin embargo, este resultado no es posible comparar con el obtenido a través de expansión controlada ya que para la ejecución del ensayo de Lambe se da una carga inicial fija y no se la modifica en el transcurso del ensayo, el ensayo de expansión controlada sí modifica su carga.

En el empleo de las correlaciones se obtuvieron resultados variados, tanto para la clasificación según el tipo de mineral predominante, grado de expansividad y porcentaje y presión de expansión. De los cuales se procedió a comparar los resultados entre sí para la selección de una clasificación final.

Para las correlaciones empleadas según el tipo de mineral predominante se tuvieron resultados acordes según Braja Das (2001) la cual se encuentra en función de la gravedad específica de la fase sólida.

Para determinar el grado de expansividad, se cuenta con un gran número de autores que presentan correlaciones, se los clasifica en dos grupos. El primer grupo utiliza



correlaciones en función de diferentes parámetros sin tomar en cuenta ensayos directos de obtención de expansión controlada y libre; el segundo grupo consideran ensayos directos. Para el primer grupo se recomienda usar la clasificación propuesta por Holtz & Gibbs (1954) influyendo únicamente el índice de plasticidad. Se considera este método de fácil obtención mediante ensayos de límites de Atterberg y con una aproximación muy buena para el caso de los suelos estudiados. Para el segundo grupo la clasificación aceptada es la realizada por González Vallejo (2002) la cual se encuentra en función de una mayor cantidad de parámetros como: porcentaje de finos, límite líquido, además de resultados de ensayo de expansión.

En el empleo de las diferentes ecuaciones propuestas como correlaciones para el cálculo del porcentaje y presión de expansividad, al momento de realizar una comparación de porcentaje de error de estos resultados con los ensayos realizados de presión y porcentaje de expansión, se tuvieron valores de error excesivo para todas las expresiones sin excepción alguna. Seguramente esto se debe a que en las muestras de las que se obtuvieron estas correlaciones no resultan similares a las utilizadas en este trabajo, es decir las correlaciones no aplican para los suelos ensayados.

Al momento de establecer una relación entre los resultados de los ensayos de expansión entre sí, se puede notar que, si se elimina la muestra de Azogues se obtiene una tendencia o relación directa entre los ensayos de expansión libre y controlada y también entre expansión libre y ensayo de Lambe, La tendencia muestra una relación lineal entre los ensayos; sin embargo, se requiere de mayor muestreo para establecer una relación representativa.



6. RECOMENDACIONES

Se recomienda el uso de la clasificación por el método de la SUCS que por la AASHTO cuando se trata de un análisis en suelos expansivos ya que se detalla el suelo con el que se cuenta, especialmente en el caso de arcillas que las cataloga de alta o baja plasticidad siendo un indicativo de un posible carácter expansivo.

El empleo de correlaciones para la obtención de valores estimados de presión de expansión y porcentaje de expansión son demasiado discordantes con los obtenidos por métodos directos – ensayos de laboratorio. Por lo cual no se recomienda el empleo de las correlaciones, sino que se realice los ensayos de expansión libre y expansión controlada directamente, si se requiere de la obtención de estos parámetros de manera precisa, aunque requieran de mayor tiempo y costo.

Se recomienda analizar la variación en humedad natural que los suelos locales podrían llegar a exhibir y su afectación dentro del comportamiento expansivo de la muestra. Muchas correlaciones utilizan la humedad natural para establecer el grado o potencial expansivo, y el presente trabajo ha utilizado únicamente una humedad para cada suelo, la humedad que presentó el material al momento del muestreo.

Las correlaciones de cuantificación deberían emplear parámetros más característicos y propios del suelo como porcentaje de finos, porcentaje de arcilla, gravedad específica de la fase sólida, etc. Se recomienda trabajar en la generación de correlaciones aplicables a suelos locales, empleando parámetros intrínsecos del suelo.

Se recomienda realizar un trabajo más minucioso con la muestra de Azogues. Dentro del presente trabajo este suelo ha generado alguna problemática al momento de ser ensayado, su alto grado de consolidación ha impedido el desarrollo normal de ensayos granulométricos, de límites y de expansión, generando resultados erráticos. Se sugiere buscar métodos alternativos de ensayo para este tipo de material.

Según los resultados obtenidos mediante una clasificación preliminar del grado de expansividad de un suelo, se puede tomar decisiones para la realización de ensayos adicionales o no, con la finalidad de obtener valores de presión y porcentaje de expansión de mayor confiabilidad.

Se recomienda tomar las debidas precauciones al momento de proyectar y construir obras civiles sobre los suelos de Challuabamba, Miraflores y Azogues, ya que han sido catalogados como suelos con muy alto potencial expansivo en este estudio.



7. BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía de Cuenca. (2017). Geoportal WEB. Recuperado de
<http://ide.cuenca.gob.ec/geoportal-web/viewer.jsf?map=5>
- ASTM 4829. (2011). Standard Test Method for Expansion Index of Soils
- ASTM D 422. (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils
- ASTM D 427. (2004). Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method
- ASTM D 854. (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soils Solids by Water Pycnometer
- Basma, A.A. (1996). Prediction of expansion degree for natural compacted clays. Geotech.
- Beltrán Martínez, R. (2009). Diseño geotécnico y estructural de una cimentación en arcilla expansiva. Mexico.
- Braja M. DAS. (2015). Fundamentos de Ingenieria Geotecnica (Cuarta). Mexico: Cengage Learning.
- Bravo Heredia, P. E., & Daza Orellana, P. A. (2019). Métodos para controlar el potencial expansivo en suelos arcillosos de la ciudad de Cuenca. Recuperado de
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/32443>
- Brito, A., & Delgado, P. (2007). Determinación de presiones de expansión en arcillas expansivas en la ciudad de cuenca. Recuperado de
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/7393>
- Chen, F.H. (1988). Foundations on expansive soil. New York, Elsevier
- Delgado Trujillo, A. (1986). Influencia de la trayectoria de las tensiones en el comportamiento de las arcillas expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno. Recuperado de
<https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/24350>
- Erguler, Z.A.; Ulusay, R.A. (2003). A simple test and predictive models for assessing swell potential of Ankara (Turkey) clay



- Hidalgo, N., Senese, A., Cano, E. N., & Sarquis, P. (2016). Caracterización y evaluación de la calidad de bentonitas provenientes de las provincias de San Juan y Río Negro (Argentina) para uso en industria petrolera y cerámica. *Boletín geológico y minero*, 127(4), 791-806.
- Holtz, W.G.; Gibbs, H.J. (1956). Engineering properties of expansive clays. *Transact. Am. Soc. Civil Eng.*
- IS2720. (1977). Determination Of Free Swell Index Of Soils.
- Kalantari, B. (2012). Foundations on Expansive Soils: A Review. 4, (*Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*).
- Komornik, A.; David, D. (1969). Prediction of swelling pressure of clays. *J. Soil Mech.*
- López Lara, T. (2014). Análisis de estructuras huecas invertidas colocadas sobre suelos expansivos. Recuperado de http://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/19_XXVII_Reunion_Nacional_de_Ingenieria_Geotecnica/36_Reunion_Nacional/83_SUELOS_NO_SATURADOS/A10L_OLT_1.docx
- Marín Nieto, L. (1991). Arcillas expansivas en Ecuador. Viña del Mar – Chile.
- Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras* (Vol. 1). Bogotá: Agora.
- Nayak, N.V.; Christensen, R.W. (1979). Swelling characteristics of compacted expansive soils. *Clay Clay Miner.*
- NTE INEN 0691. (1982). Determinación del límite líquido. Método de Casagrande
- NTE INEN 0692. (1982). Determinación del límite plástico
- NTE INEN 0696. (2011). Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso



- Sabtán, A.A. (2005). Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudia Arabia.
- Seed, H.B.; Woodward, R.J.; Lundgren, R. (1962). Prediction of swelling potential for compacted clays. J. Soil Mech.
- Schneider, G.L.; Poor, A.R. (1974). The Prediction of Soil Heave and Swell Pressures Developed by an Expansive Clay. Contraction Research Center, University of Texas
- Skempton, A.W. (1953). The Colloidal Activity of Clays, 3d International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Switzerland.
- UNICAUCA. (2007). Norma INV E 120: Determinación del potencial de expansividad de un suelo en el aparato de Lambe. Cauca.
- Vijayvergia, V.N.; Ghazzly, O.I. (1973). Prediction of swelling potential for natural clays. In: Third International Conference on Expansive Soils.
- Vélez, P. (2012). Comprobación de las correlaciones de la presión de expansión con las propiedades índices en suelos del sector Challuabamba, Cuenca, recomendaciones para la construcción de cimentaciones. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/2558>

8. ANEXOS

Anexo 1

Tabla 4.1 Clasificación de materiales de carreteras subrasantes

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
	A-1			A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10	50 máx.						
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Limo o grava arcillosa y arena			
Clasificación general de la subrasante	Excelente a bueno						

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)			
				A-7 A-7-5* A-7-6 [†]
Grupo de clasificación	A-4	A-5	A-6	
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)				
Núm. 10				
Núm. 40				
Núm. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción de paso núm. 40				
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación general de la subrasante	Regular a malo			

*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$

†Para A-7-6, $PI > LL - 30$

Anexo 2

Tabla 4.2 Sistema unificado de clasificación de suelo (basado en el material que pasa por el tamiz núm. 75)

Criterio para la asignación de símbolos de grupo			Símbolos de grupo
Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias Menos de 5% finos ^a	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$ $C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^c$	GW GP
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas con finos Más de 12% finos ^{a,d}	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) $PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	GM GC
Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Arenas limpias Menos de 5% finos ^b Arenas con finos Más de 12% finos ^{b,d}	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$ $C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3^c$ $PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) $PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	SW SP SM SC
Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2) ^e $PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) ^e	CL ML
Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Orgánico	Límite líquido: secado < 0.75 ; vea la figura 4.2; zona OL Límite líquido: no secado	OL
Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico	Gráficos PI en o por encima de línea "A" (figura 4.2) Gráficos PI por debajo de "A" línea (figura 4.2)	CH MH
	Orgánico	Límite líquido: secado < 0.75 ; vea la figura 4.2; zona OH Límite líquido: no secado	OH
Suelos altamente orgánicos	Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico		Pt

^aGravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GP-GC, GP-GC.

^bArenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

$$^c C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

^dSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.

^eSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo CL-ML.

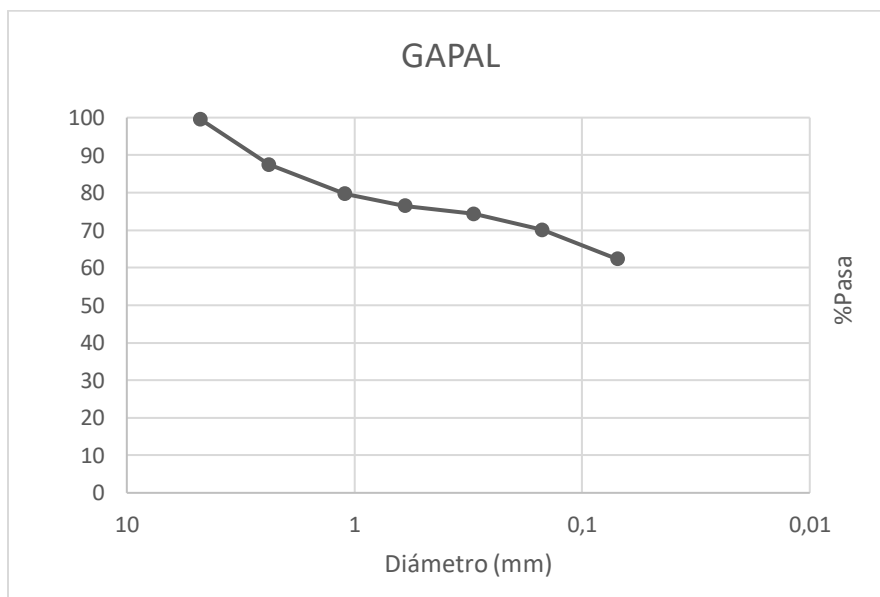
Anexo 3

Gapal

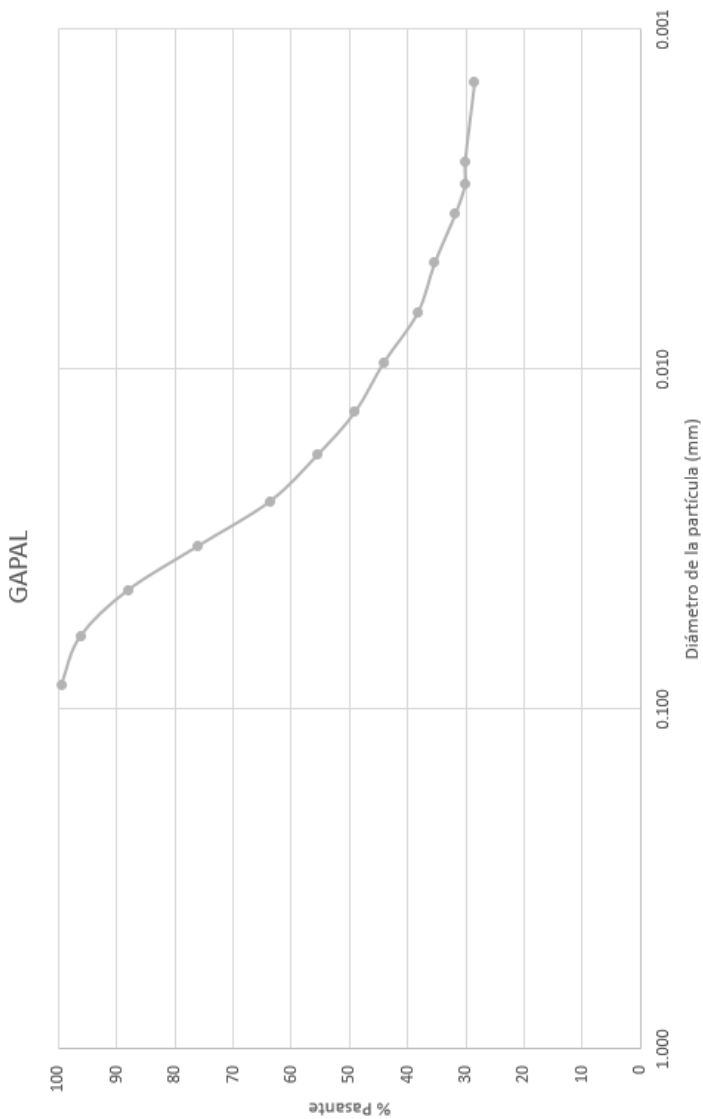
GRANULOMETRÍA					
GAPAL					
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	% Retenido acumulado	%Pasa
N.4	4.75	2.2	2.2	0.4	99.6
N.8	2.38	60.3	62.5	12.5	87.5
N.16	1.1	39	101.5	20.3	79.7
N.30	0.6	16.2	117.7	23.5	76.5
N.50	0.3	10.5	128.2	25.6	74.4
N.100	0.15	21.4	149.6	29.9	70.1
N.200	0.07	39	188.6	37.7	62.3
Fondo	0	311.4	500	100.0	0.0

Peso Inicial (gr)	500
Peso Final (gr)	500
Error (%)	0.00

HUMEDAD				
GAPAL				
Tara	Suelo Humedo (gr)	Suelo seco (gr)	Humedad (%)	Promedio (%)
1	8.3	6.9	20.29	18.47
2	14.2	12	18.33	
3	15.3	13.1	16.79	



HIDRÓMETRO																
GAPAL																
t (seg)	15	30	60	120	240	480	900	1800	3600	7200	14400	21600	28800	86400		
R	27	26	23.5	19.8	16	13.5	11.5	10	8.5	7.8	6.5	6	6	5.5		
RW	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3		
T (°C)	17	17	17	17	17	16.5	16.5	16.5	17	17	17	17	17.5	17		
CT	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6		
R corregido	30.6	29.6	27.1	23.4	19.6	17.1	15.1	13.6	12.1	11.4	10.1	9.6	9.6	9.1		
Zr (cm)	10.415	10.686	11.364	12.366	13.396	14.074	14.616	15.022	15.429	15.618	15.971	16.106	16.106	16.242		
Zrc (cm)	9.315	9.586	10.264	11.267	12.296	12.974	13.516	13.922	14.329	14.519	14.871	15.006	15.006	15.142		
Coef de viscosidad n	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001185	0.00001185	0.00001185	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.0000109	0.00001104		
Yc (corregido)	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.998945	0.998945	0.998945	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99877	0.99886		
D (mm)	0.0852	0.0611	0.0447	0.0331	0.0245	0.0179	0.0133	0.0096	0.0068	0.0049	0.0035	0.0029	0.0025	0.0014		
%Pasa N	99.4983	96.2467	88.1178	76.0869	63.7309	55.6067	49.1030	44.2252	38.3686	35.4422	31.8655	30.2397	30.2370	28.6139		

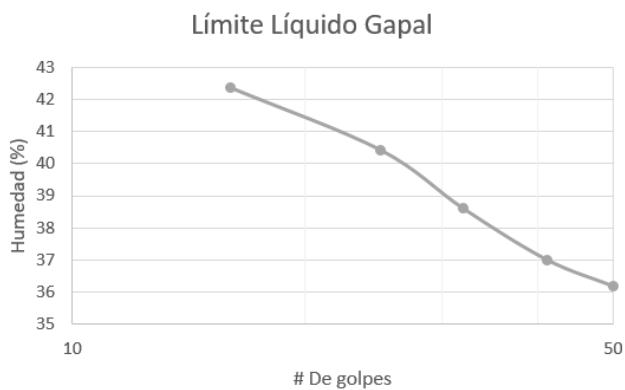




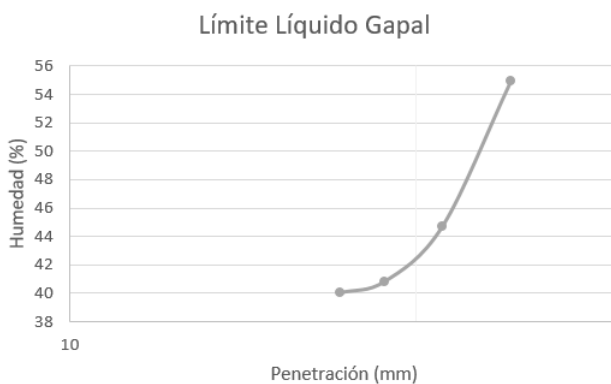
PESO ESPECÍFICO DE LA FASE SÓLIDA			
GAPAL			
Temperatura (°C)	Matraz+agua+ suelo (gr) Wa	Wmatraz+agua (gr) Wb	Gs
27	678.4	650.925	2.714
23	679.7	652.285	2.703
20	680.6	653.304	2.680
Wseco (gr) Ws	43.5	Promedio Gs	<u>2.699</u>
γ_W (Kg/m ³)	1000		



LÍMITE LÍQUIDO									
CASAGRANDE									
GAPAL									
# Golpes	W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (w)						
50	12.8	9.4	36.17						
41	13.7	10	37.00						
32	15.8	11.4	38.60						
25	13.2	9.4	40.43						
16	16.8	11.8	42.37						
<table><tr><th colspan="2">LL GAPAL</th></tr><tr><td># Golpes</td><td>Humedad %</td></tr><tr><td>25</td><td>40.4</td></tr></table>				LL GAPAL		# Golpes	Humedad %	25	40.4
LL GAPAL									
# Golpes	Humedad %								
25	40.4								



LÍMITE LÍQUIDO									
PENETRACIÓN DE CONO									
GAPAL									
Penetración mm	W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (ω)						
24.2	23.4	15.1	54.97						
21.1	45	31.1	44.69						
18.8	17.6	12.5	40.80						
17.2	18.2	13	40.00						
<table><tr><th colspan="2">LL GAPAL</th></tr><tr><td>Penetración</td><td>Humedad %</td></tr><tr><td>20 mm</td><td>42.5</td></tr></table>				LL GAPAL		Penetración	Humedad %	20 mm	42.5
LL GAPAL									
Penetración	Humedad %								
20 mm	42.5								

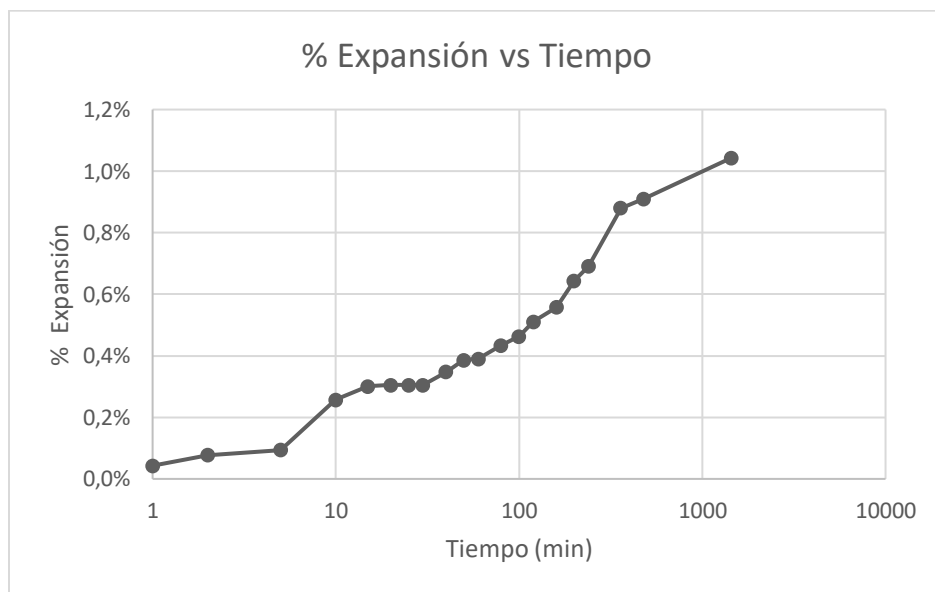


LÍMITE CONTRACCIÓN			
GAPAL			
W _{recipiente} (gr)	9.7	V _{recipiente} (cm3)	16.8
W _{recipiente+ hg} (gr)	238.3	Humedad suelo (%)	38
W _{recipiente+ suelohumedo} (gr)	40.1	Volumen Pastilla (cm3)	14.1
W _{recipiente+ sueloseco} (gr)	31.8	Volumen Agua (cm3)	2.7
W _{hgdesplaza do} (gr)	192.2	LC (%)	25.4

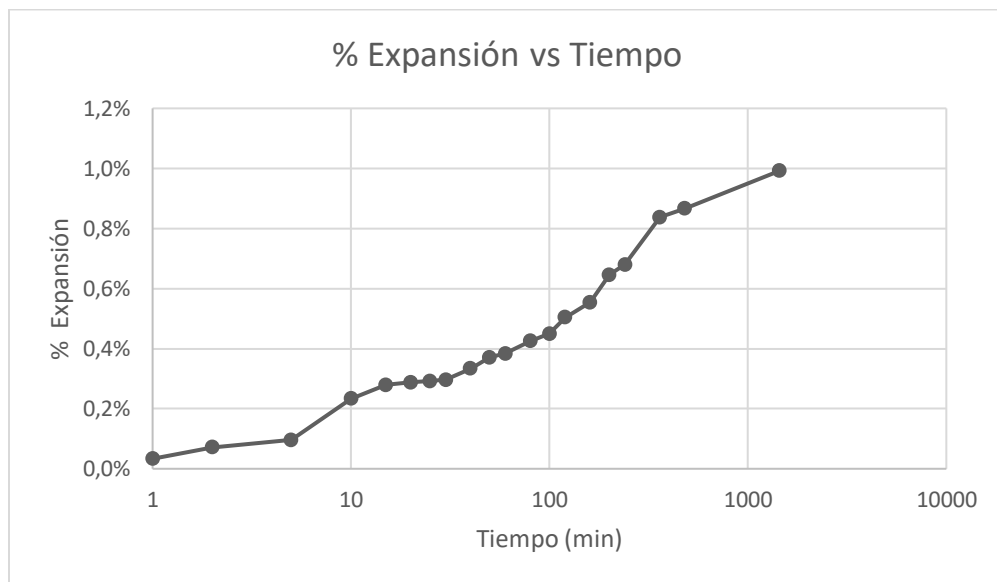
LÍMITE PLÁSTICO		
GAPAL		
W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (ω)
3.4	2.8	21.43
4	3.2	25.00
6.2	5	24.00
		23.48

Índice Plástico	Índice Líquido	Actividad
16.92	-28.8	0.9

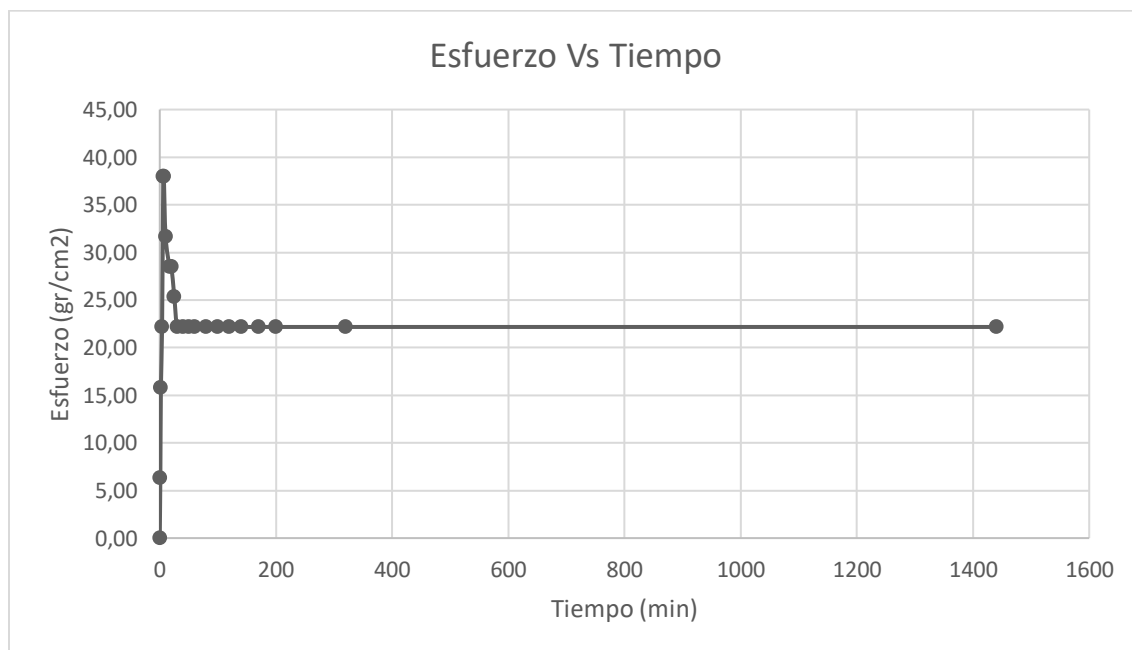
EXPANSIÓN LIBRE						
GAPAL M1						
DATOS			Tiempo	DIAL	ΔN	Expansión
			(min)	(0,01 mm)	(1 mm)	(%)
h anillo (cm)	2.33		0	0	0	0.00%
Diámetro (cm)	6.27		1	1	0.01	0.04%
Wanillo (gr)	106.6		2	1.8	0.018	0.08%
Wsueloantes(gr)	128.1		5	2.2	0.022	0.09%
Wsuelofinal (gr)	133.9		10	6	0.06	0.26%
Wsueloseco	96.5		15	7	0.07	0.30%
Ss	2.699		20	7.1	0.071	0.30%
			25	7.1	0.071	0.30%
			30	7.1	0.071	0.30%
Variación volumétrica (%)	1.04%		40	8.1	0.081	0.35%
Volumen final (cm3)	71.95		50	9	0.09	0.39%
			60	9.1	0.091	0.39%
			80	10.1	0.101	0.43%
			100	10.8	0.108	0.46%
CÁLCULOS	Inicial	Final	120	11.9	0.119	0.51%
Humedad (%)	32.75	38.76	160	13	0.13	0.56%
Volumen (cm3)	71.94	71.95	200	15	0.15	0.64%
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.78	1.86	240	16.1	0.161	0.69%
Peso Esp. Seco (gr/cm3)	1.34	1.34	360	20.5	0.205	0.88%
Espacios vacíos (e)	1.01	1.01	480	21.2	0.212	0.91%
Saturación (S)	87.32	103.33	1440	24.3	0.243	1.04%



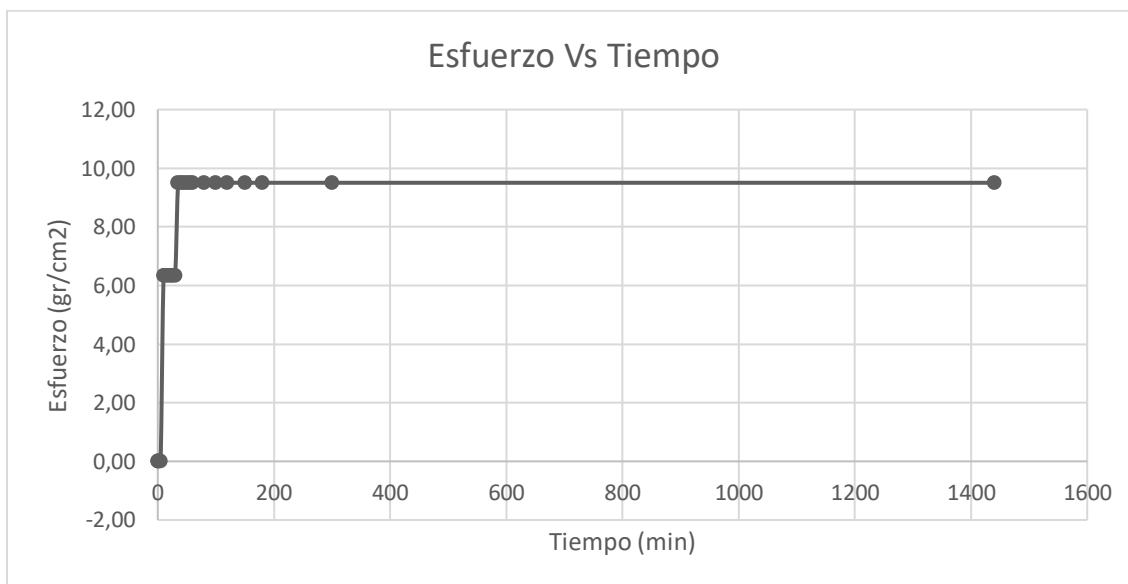
EXPANSIÓN LIBRE						
GAPAL M2						
DATOS			Tiempo	DIAL	ΔN	Expansión
h anillo (cm)	2.4		(min)	(0,01 mm)	(1 mm)	(%)
Diámetro (cm)	6.32		0	0	0	0.00%
Wanillo (gr)	112.3		1	0.8	0.008	0.03%
Wsueloantes(gr)	131.3		2	1.7	0.017	0.07%
Wsuelofinal (gr)	134.5		5	2.3	0.023	0.10%
Wsueloseco	98.6		10	5.6	0.056	0.23%
Ss	2.699		15	6.7	0.067	0.28%
			20	6.9	0.069	0.29%
			25	7	0.07	0.29%
Variación volumétrica (%)	0.99%		30	7.1	0.071	0.30%
Volumen final (cm3)	75.30		40	8	0.08	0.33%
			50	8.9	0.089	0.37%
			60	9.2	0.092	0.38%
			80	10.2	0.102	0.43%
			100	10.8	0.108	0.45%
CÁLCULOS	Inicial	Final	120	12.1	0.121	0.50%
Humedad (%)	33.16	36.41	160	13.3	0.133	0.55%
Volumen (cm3)	75.29	75.30	200	15.5	0.155	0.65%
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.74	1.79	240	16.3	0.163	0.68%
Peso Esp. Seco (gr/cm3)	1.31	1.31	360	20.1	0.201	0.84%
Espacios vacíos (e)	1.06	1.06	480	20.8	0.208	0.87%
Saturación (S)	84.37	92.61	1440	23.8	0.238	0.99%



EXPANSIÓN CONTROLADA						
GAPAL M1						
DATOS			Tiempo	DIAL	Carga	Esfuerzo
			(min)	(0,01 mm)	(gr)	(gr/cm ²)
h anillo (cm)	2.41		0	0	0	0.00
Diámetro (cm)	6.34		1	0.9	20	6.34
Wanillo (gr)	106.9		2	1	50	15.84
Wsueloantes(gr)	126.7		4	1	70	22.17
Wsuelofinal (gr)	137.4		6	0.2	120	38.01
Wsueloseco	101.3		7	-0.7	120	38.01
Ss	2.699		10	-0.5	100	31.68
			17	-0.7	90	28.51
			20	-0.7	90	28.51
			25	-0.7	80	25.34
			30	0.1	70	22.17
			40	0	70	22.17
			50	0	70	22.17
			60	0	70	22.17
			80	0	70	22.17
			100	0	70	22.17
			120	0	70	22.17
			140	0	70	22.17
			170	0	70	22.17
			200	0	70	22.17
			320	0	70	22.17
			1440	0	70	22.17
CÁLCULOS	Inicial	Final				
Humedad (%)	25.07	35.64				
Volumen (cm ³)	76.08	76.08				
Densidad húmeda (gr/cm ³)	1.67	1.81				
Peso Esp. Seco (gr/cm ³)	1.33	1.33				
Espacios vacíos (e)	1.03	1.03				
Saturación (S)	65.89	93.64				



EXPANSIÓN CONTROLADA						
GAPAL M3						
DATOS			Tiempo	DIAL	Carga	Esfuerzo
h anillo (cm)	2.33		(min)	(0,01 mm)	(gr)	(gr/cm2)
Diámetro (cm)	6.27		0	0	0	0.00
Wanillo (gr)	106.6		1	0	0	0.00
Wsueloantes(gr)	124.6		2	0	0	0.00
Wsuelofinal (gr)	131.9		5	0.5	0	0.00
Wsueloseco	101		10	0.2	20	6.34
Ss	2.699		15	0	20	6.34
			20	0	20	6.34
			25	0	20	6.34
		30	0	20	6.34	
		35	0.2	30	9.50	
		CÁLCULOS		40	0	30
Humedad (%)	23.37	30.59	45	0	30	9.50
Volumen (cm3)	71.94	71.94	50	0	30	9.50
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.73	1.83	55	0	30	9.50
Peso Esp. Seco (gr/cm3)	1.40	1.40	60	0	30	9.50
Espacios vacíos (e)	0.92	0.92	80	0	30	9.50
Saturación (S)	68.37	89.51	100	0	30	9.50
			120	0	30	9.50
			150	0	30	9.50
			180	0	30	9.50
			300	0	30	9.50
			1440	0	30	9.50



Expansión Libre en probeta	
Gapal	
Volumen inicial	10
Volumen final	11
% de Expansión	10

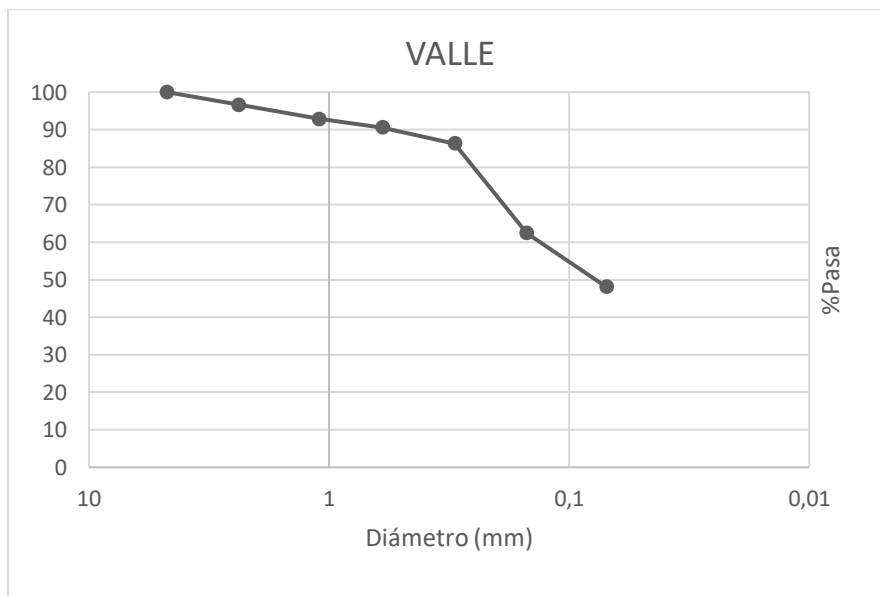




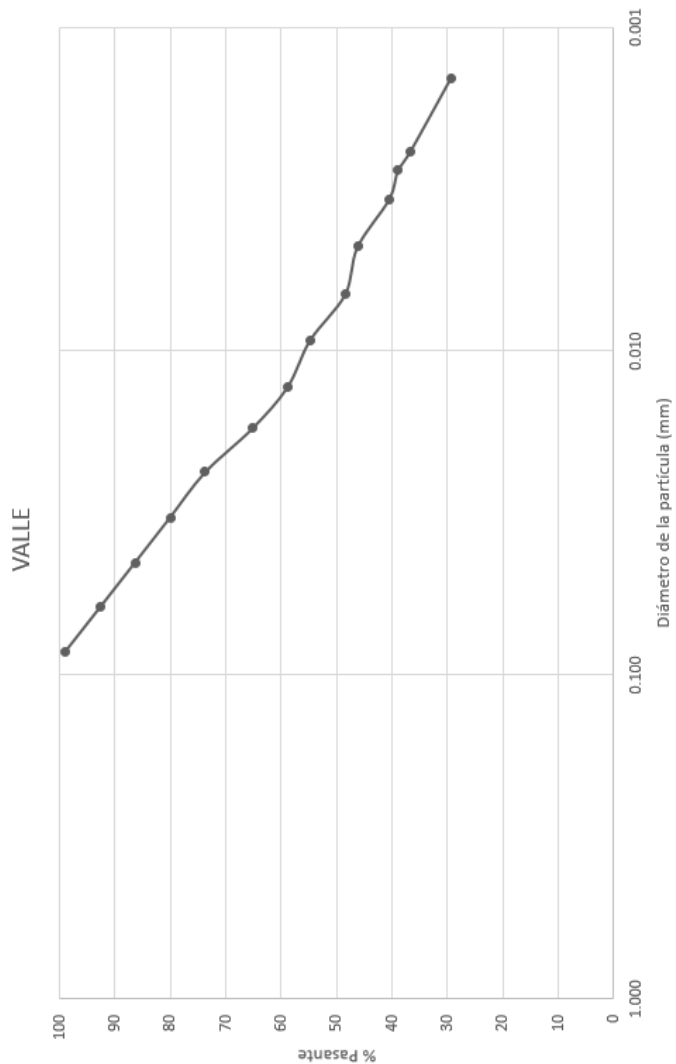
APARATO DE LAMBE				
GAPAL				
Condición de humedad		LP = 23,5%		Datos de la probeta
Cantidad de capas		#	1	Diámetro (mm)
Cantidad de golpes		#	5	Área (mm ²)
Tiempo	Lectura del anillo	Fuerza	Índice de Expansión	Cambio Volumétrico
s	Dinamométrico	N	Mpa	
60	5	54.00	0.014	Marginal
120	5.8	62.48	0.016	Marginal
180	6.3	67.76	0.018	Marginal
240	7.1	76.18	0.020	Marginal
300	7.9	84.55	0.022	Marginal
600	10	106.32	0.028	Crítico
900	11	116.59	0.030	Crítico
1800	11.9	125.77	0.033	Crítico
3600	12.1	127.80	0.033	Crítico
5400	12.2	128.82	0.033	Crítico
7200	12.2	128.82	0.033	<u>Crítico</u>

Chilcapamba (Valle)

GRANULOMETRÍA											
VALLE											
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	% Retenido acumulado	%Pasa						
N.4	4.75	0.1	0.1	0.0	100.0						
N.8	2.38	16.8	16.9	3.4	96.6						
N.16	1.1	18.8	35.7	7.1	92.9						
N.30	0.6	11.7	47.4	9.5	90.5						
N.50	0.3	21.1	68.5	13.7	86.3						
N.100	0.15	119.3	187.8	37.6	62.4						
N.200	0.07	71.7	259.5	51.9	48.1						
Fondo	0	240.3	499.8	100.0	0.0						
<table><tr><td>Peso Inicial (gr)</td><td>500</td></tr><tr><td>Peso Final (gr)</td><td>499.8</td></tr><tr><td>Error (%)</td><td>0.04</td></tr></table>						Peso Inicial (gr)	500	Peso Final (gr)	499.8	Error (%)	0.04
Peso Inicial (gr)	500										
Peso Final (gr)	499.8										
Error (%)	0.04										
HUMEDAD											
VALLE											
Tara	Suelo Humedo (gr)	Suelo seco (gr)	Humedad (%)	Promedio (%)							
1	17.3	16.2	6.79	5.70							
2	15.8	15.1	4.64								
3	11.2	10.6	5.66								



HIDRÓMETRO																
VALLE																
t (seg)	15	30	60	120	240	480	900	1800	3600	7200	14400	21600	28800	36400	86400	
R	28	26	24	22	20	17	15	14	12	11	9.5	9	8	6	6	
RW	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0	0	0.3	0.3	0	0.3	0.3	0	0.3	0.3	
T (°C)	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17.5	18	18	17	17	
CT	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	
R corregido	31.6	29.6	27.6	25.6	23.6	20.6	18.6	17.6	15.6	14.6	13.1	12.6	11.6	9.6	9.6	
Zr (cm)	10.144	10.686	11.228	11.770	12.312	13.125	13.667	13.938	14.480	14.751	15.158	15.293	15.564	16.106	16.106	
Zrc (cm)	9.044	9.586	10.128	10.670	11.212	12.025	12.567	12.838	13.380	13.651	14.058	14.193	14.464	15.006	15.006	
Coef de viscosidad n	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.0000109	0.00001076	0.00001076	0.00001104	0.00001104	
γc (corregido)	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99877	0.99868	0.99868	0.99886	0.99886	
D (mm)	0.0850	0.0619	0.0450	0.0326	0.0237	0.0173	0.0129	0.0092	0.0067	0.0048	0.0034	0.0028	0.0024	0.0014	0.0014	
%Pasa N	99.0533	92.7240	86.3947	80.0654	73.7362	65.1916	58.8623	54.7483	48.4190	46.2038	40.5038	38.9181	36.7032	29.4312	29.4312	

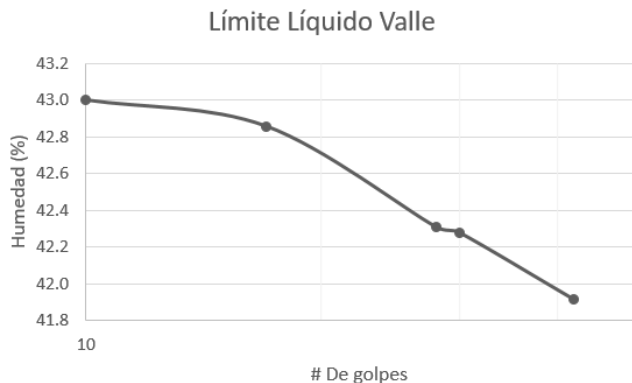




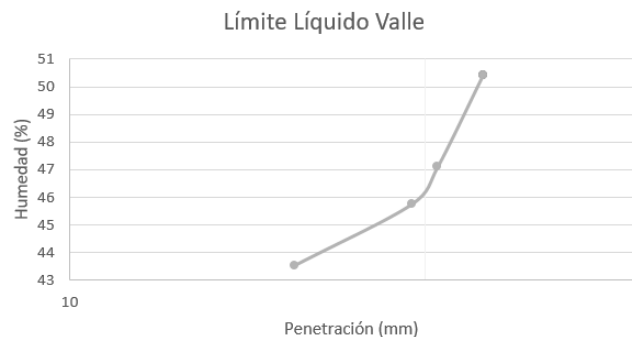
PESO ESPECÍFICO DE LA FASE SÓLIDA			
VALLE			
Temperatura (°C)	Matraz+agua+ suelo (gr) W_a	$W_{matraz+agua}$ (gr) W_b	G_s
30	677	649.906	2.697
25	678.4	651.605	2.650
21	679.6	652.964	2.627
W_{seco} (gr) W_s	43	Promedio G_s	<u>2.658</u>
γ_W (Kg/m ³)	1000		



LÍMITE LÍQUIDO									
CASAGRANDE									
VALLE									
# Golpes	W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (ω)						
42	19.3	13.6	41.91						
30	17.5	12.3	42.28						
28	14.8	10.4	42.31						
17	14	9.8	42.86						
10	14.3	10	43.00						
<table><tr><th colspan="2">LL VALLE</th></tr><tr><td># Golpes</td><td>Humedad %</td></tr><tr><td>25</td><td>42.5</td></tr></table>				LL VALLE		# Golpes	Humedad %	25	42.5
LL VALLE									
# Golpes	Humedad %								
25	42.5								



LÍMITE LÍQUIDO									
PENETRACIÓN DE CONO									
VALLE									
Penetración mm	W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (ω)						
22.4	53.7	35.7	50.42						
20.5	17.8	12.1	47.11						
19.5	17.2	11.8	45.76						
15.5	30	20.9	43.54						
<table><tr><th colspan="2">LL VALLE</th></tr><tr><td>Penetración</td><td>Humedad %</td></tr><tr><td>20 mm</td><td>46.2</td></tr></table>				LL VALLE		Penetración	Humedad %	20 mm	46.2
LL VALLE									
Penetración	Humedad %								
20 mm	46.2								

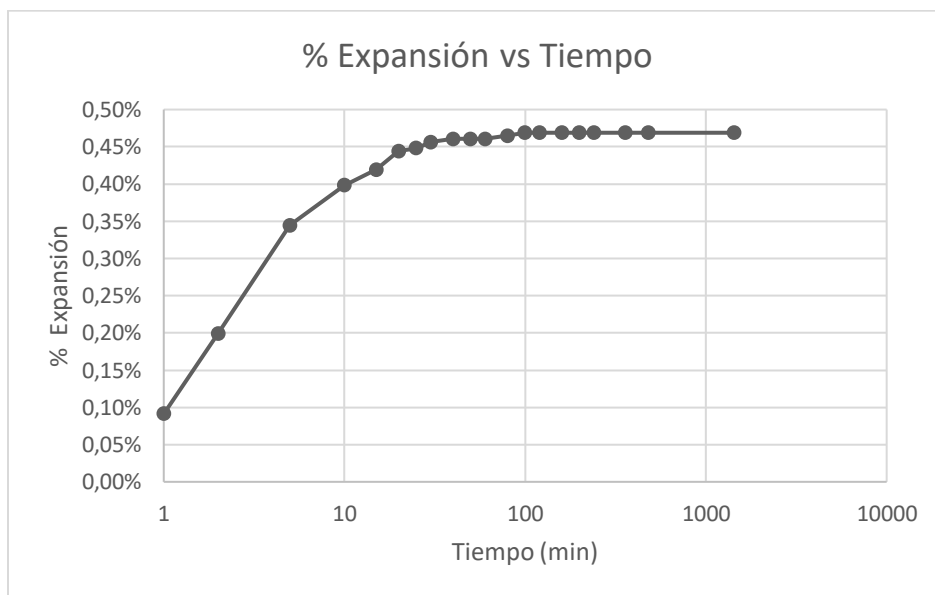


LÍMITE CONTRACCIÓN			
VALLE			
W _{recipiente} (gr)	9.7	V _{recipiente} (cm3)	15.7
W _{recipiente+ hg (gr)}	223.5	Humedad suelo (%)	42.6
W _{recipiente+ suelohumedo (gr)}	38.5	Volumen Pastilla (cm3)	12.6
W _{recipiente+ sueloseco (gr)}	29.9	Volumen Agua (cm3)	3.1
W _{hgdesplaza do (gr)}	171.5	LC (%)	27.2

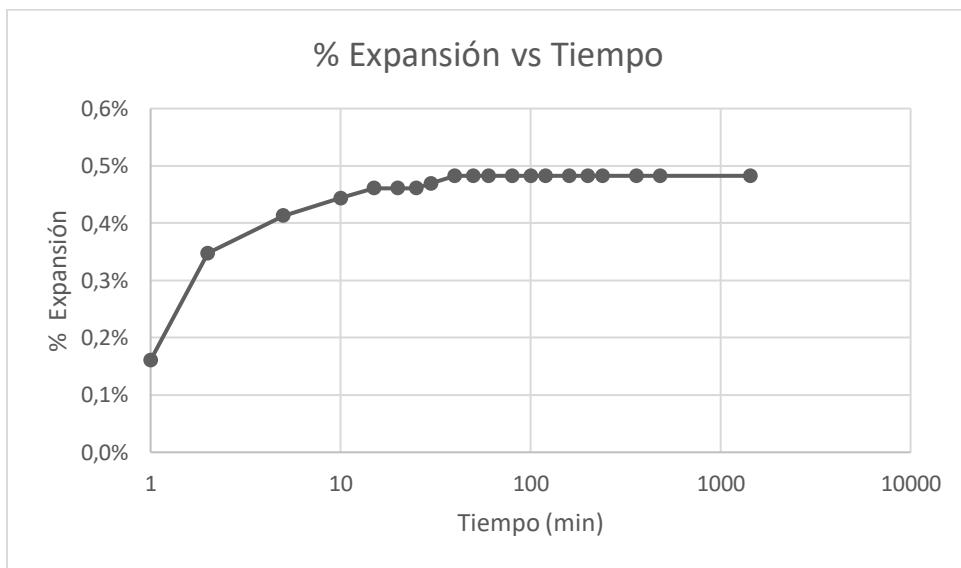
LÍMITE PLÁSTICO		
VALLE		
W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (ω)
6.1	4.9	24.49
4.8	3.9	23.08
5.7	4.6	23.91
		23.83

Índice Plástico	Índice Líquido	Actividad
18.67	-97.6	1.1

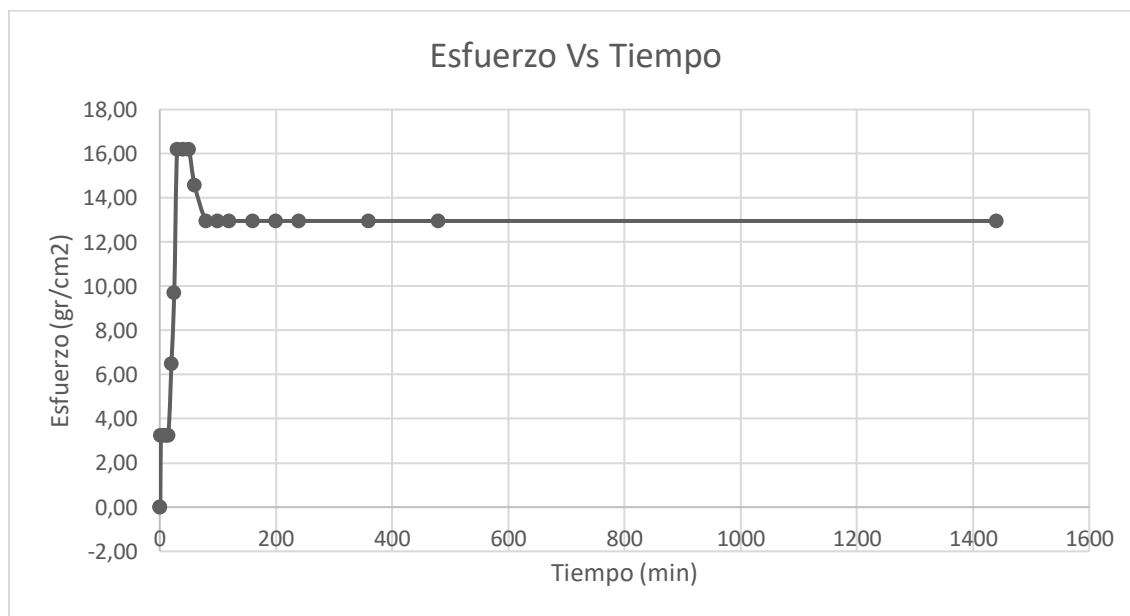
EXPANSIÓN LIBRE						
VALLE M1						
DATOS			Tiempo	DIAL	ΔN	Expansión
h anillo (cm)	2.41		(min)	(0,01 mm)	(1 mm)	(%)
Diámetro (cm)	6.34		0	0	0	0.00%
Wanillo (gr)	106.9		1	2.2	0.022	0.09%
Wsueloantes(gr)	103.5		2	4.8	0.048	0.20%
Wsuelofinal (gr)	125		5	8.3	0.083	0.34%
Wsueloseco	81.5		10	9.6	0.096	0.40%
Ss	2.658		15	10.1	0.101	0.42%
			20	10.7	0.107	0.44%
			25	10.8	0.108	0.45%
			30	11	0.11	0.46%
Variación volumétrica (%)	0.47%		40	11.1	0.111	0.46%
Volumen final (cm3)	76.09		50	11.1	0.111	0.46%
			60	11.1	0.111	0.46%
			80	11.2	0.112	0.46%
			100	11.3	0.113	0.47%
CÁLCULOS	Inicial	Final	120	11.3	0.113	0.47%
Humedad (%)	26.99	53.37	160	11.3	0.113	0.47%
Volumen (cm3)	76.08	76.09	200	11.3	0.113	0.47%
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.36	1.64	240	11.3	0.113	0.47%
Peso Esp. Seco (gr/cm3)	1.07	1.07	360	11.3	0.113	0.47%
Espacios vacíos (e)	1.48	1.48	480	11.3	0.113	0.47%
Saturación (S)	48.44	95.76	1440	11.3	0.113	0.47%



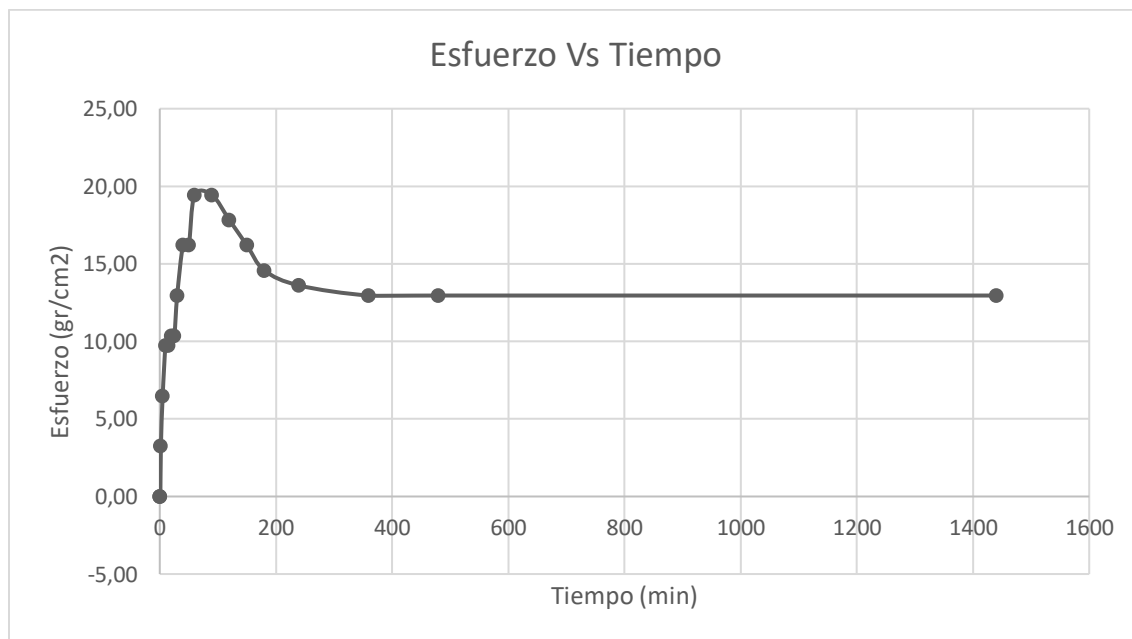
EXPANSIÓN LIBRE						
VALLE M2						
DATOS			Tiempo	DIAL	ΔN	Expansión
h anillo (cm)	2.3		(min)	(0,01 mm)	(1 mm)	(%)
Diámetro (cm)	6.32		0	0	0	0.00%
Wanillo (gr)	107.1		1	3.7	0.037	0.16%
Wsueloantes(gr)	112.5		2	8	0.08	0.35%
Wsuelofinal (gr)	133.5		5	9.5	0.095	0.41%
Wsueloseco	92.5		10	10.2	0.102	0.44%
Ss	2.658		15	10.6	0.106	0.46%
			20	10.6	0.106	0.46%
			25	10.6	0.106	0.46%
			30	10.8	0.108	0.47%
Variación volumétrica (%)	0.48%		40	11.1	0.111	0.48%
Volumen final (cm3)	72.16		50	11.1	0.111	0.48%
			60	11.1	0.111	0.48%
			80	11.1	0.111	0.48%
			100	11.1	0.111	0.48%
			120	11.1	0.111	0.48%
			160	11.1	0.111	0.48%
			200	11.1	0.111	0.48%
			240	11.1	0.111	0.48%
			360	11.1	0.111	0.48%
			480	11.1	0.111	0.48%
			1440	11.1	0.111	0.48%
CÁLCULOS	Inicial	Final				
Humedad (%)	21.62	44.32				
Volumen (cm3)	72.15	72.16				
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.56	1.85				
Peso Esp. Seco (gr/cm3)	1.28	1.28				
Espacios vacíos (e)	1.07	1.07				
Saturación (S)	53.54	109.76				



EXPANSIÓN CONTROLADA						
VALLE M1						
DATOS			Tiempo	DIAL	Carga	Esfuerzo
h anillo (cm)	2.33		(min)	(0,01 mm)	(gr)	(gr/cm2)
Diámetro (cm)	6.27		0	0	0	0.00
Wanillo (gr)	106.6		1	0	0	0.00
Wsueloantes(gr)	111.4		2	0.1	10	3.24
Wsuelofinal (gr)	115.9		5	0.1	10	3.24
Wsueloseco	82		10	0.1	10	3.24
Ss	2.658		15	0.2	10	3.24
			20	0.2	20	6.48
			25	0.2	30	9.72
CÁLCULOS	Inicial	Final	30	0.2	50	16.19
Humedad (%)	35.85	41.34	40	0.1	50	16.19
Volumen (cm3)	71.94	71.94	50	0	50	16.19
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.55	1.61	60	-0.1	45	14.57
Peso Esp. Seco (gr/cm3)	1.14	1.14	80	0	40	12.95
Espacios vacíos (e)	1.33	1.33	100	0	40	12.95
Saturación (S)	71.55	82.50	120	0	40	12.95
			160	0	40	12.95
			200	0	40	12.95
			240	0	40	12.95
			360	0	40	12.95
			480	0	40	12.95
			1440	0	40	12.95



EXPANSIÓN CONTROLADA						
VALLE M2						
DATOS			Tiempo	DIAL	Carga	Esfuerzo
h anillo (cm)	2.4		(min)	(0,01 mm)	(gr)	(gr/cm ²)
Diámetro (cm)	6.32		0	0	0	0.00
Wanillo (gr)	112.3		1	0.1	0	0.00
Wsueloantes(gr)	106.6		2	0.1	10	3.24
Wsuelofinal (gr)	112.7		5	0.1	20	6.48
Wsueloseco	80.4		10	0.1	30	9.72
Ss	2.658		15	0.1	30	9.72
			20	0.1	32	10.36
			25	0.1	32	10.36
CÁLCULOS	Inicial	Final	30	0.1	40	12.95
Humedad (%)	32.59	40.17	40	0.1	50	16.19
Volumen (cm ³)	75.29	75.29	50	0.1	50	16.19
Densidad húmeda (gr/cm ³)	1.42	1.50	60	0	60	19.43
Peso Esp. Seco (gr/cm ³)	1.07	1.07	90	-0.1	60	19.43
Espacios vacíos (e)	1.49	1.49	120	-0.1	55	17.81
Saturación (S)	58.17	71.71	150	-0.1	50	16.19
			180	-0.1	45	14.57
			240	-0.1	42	13.60
			360	0	40	12.95
			480	0	40	12.95
			1440	0	40	12.95



Expansión Libre en probeta	
Valle	
Volumen inicial	10
Volumen final	13
% de Expansión	30

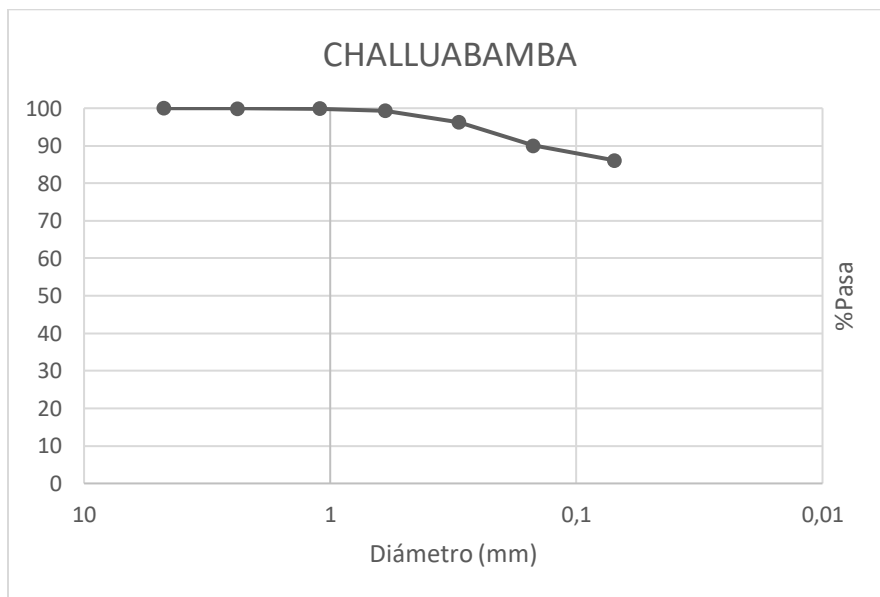




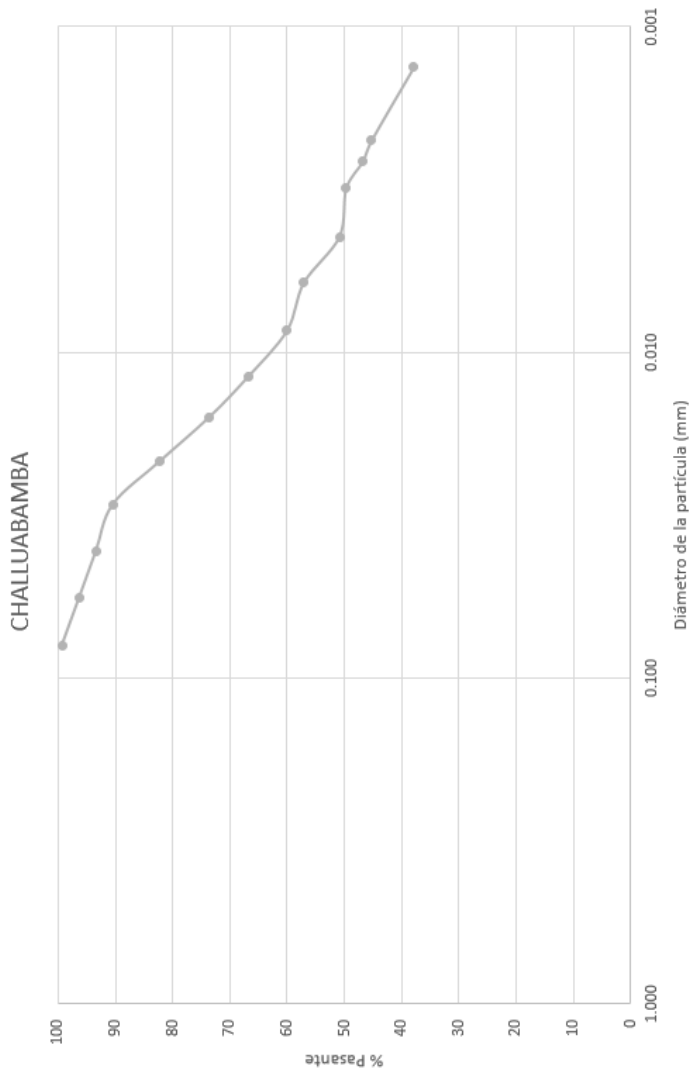
APARATO DE LAMBE				
VALLE				
Condición de humedad		LP = 23,8%		Datos de la probeta
Cantidad de capas		#	1	Diámetro (mm)
Cantidad de golpes		#	5	Área (mm ²)
Tiempo	Lectura del anillo	Fuerza	Índice de Expansión	Cambio Volumétrico
s	Dinamométrico	N	Mpa	
60	4.5	48.67	0.013	Marginal
120	5	54.00	0.014	Marginal
180	5.2	56.12	0.015	Marginal
240	5.8	62.48	0.016	Marginal
300	6	64.59	0.017	Marginal
600	6.9	74.08	0.019	Marginal
900	7.2	77.23	0.020	Marginal
1800	7.9	84.55	0.022	Marginal
3600	8.1	86.64	0.023	Marginal
5400	8.5	90.80	0.024	Marginal
7200	8.5	90.80	0.024	Marginal

Challuabamba

GRANULOMETRÍA											
CHALLUABAMBA											
Tamiz	Abertura	Peso Retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	% Retenido acumulado	%Pasa						
	(mm)										
N.4	4.75	0	0	0.0	100.0						
N.8	2.38	0.4	0.4	0.1	99.9						
N.16	1.1	0.3	0.7	0.1	99.9						
N.30	0.6	2.5	3.2	0.6	99.4						
N.50	0.3	15.6	18.8	3.8	96.2						
N.100	0.15	31.1	49.9	10.0	90.0						
N.200	0.07	19.6	69.5	13.9	86.1						
Fondo	0	430.6	500.1	100.0	0.0						
<table><tr><td>Peso Inicial (gr)</td><td>500</td></tr><tr><td>Peso Final (gr)</td><td>500.1</td></tr><tr><td>Error (%)</td><td>-0.02</td></tr></table>						Peso Inicial (gr)	500	Peso Final (gr)	500.1	Error (%)	-0.02
Peso Inicial (gr)	500										
Peso Final (gr)	500.1										
Error (%)	-0.02										
HUMEDAD											
CHALLUABAMBA											
Tara	Suelo Humedo (gr)	Suelo seco (gr)	Humedad	Promedio							
			(%)	(%)							
1	13.2	10.6	24.53	25.79							
2	17.5	13.8	26.81								
3	12.1	9.6	26.04								



HIDRÓMETRO															
CHALLUABAMBA															
t (seg)	15	30	60	120	240	480	900	1800	3600	7200	14400	21600	28800	36400	
R	30	29	28	27	24.2	21.3	19	17.2	16	14	13.5	12.5	12	9.5	
RW	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	
T (°C)	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	17	17	17	17	17.5	17	
CT	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	
R corregido	33.6	32.6	31.6	30.6	27.8	24.9	22.6	20.8	19.6	17.6	17.1	16.1	15.6	13.1	
Zr (cm)	9.602	9.873	10.144	10.415	11.174	11.960	12.583	13.071	13.396	13.938	14.074	14.345	14.480	15.158	
Zrc (cm)	8.502	8.773	9.044	9.315	10.074	10.860	11.483	11.971	12.296	12.838	12.974	13.245	13.380	14.058	
Coef de viscosidad n	0.000011185	0.000011185	0.000011185	0.000011185	0.000011185	0.000011185	0.000011185	0.000011185	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.0000109	0.00001104	
Yc (corregido)	0.998945	0.998945	0.998945	0.998945	0.998945	0.998945	0.998945	0.998945	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99877	0.99886	
D (mm)	0.0783	0.0570	0.0409	0.0293	0.0216	0.0158	0.0119	0.0086	0.0061	0.0044	0.0031	0.0026	0.0022	0.0013	
%Pasa N	99.3462	96.3895	93.4328	90.4760	82.1972	73.6226	66.8222	60.0217	57.0601	50.8515	49.6889	46.7124	45.2301	37.8430	

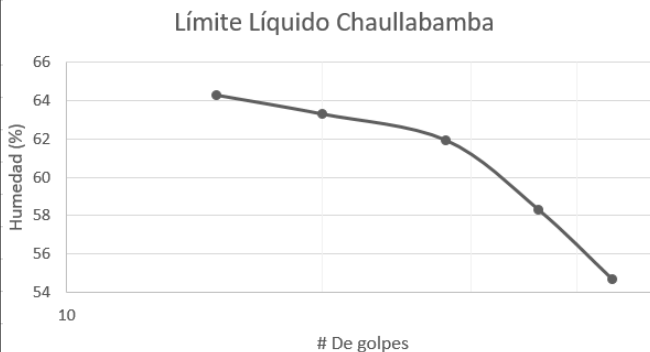




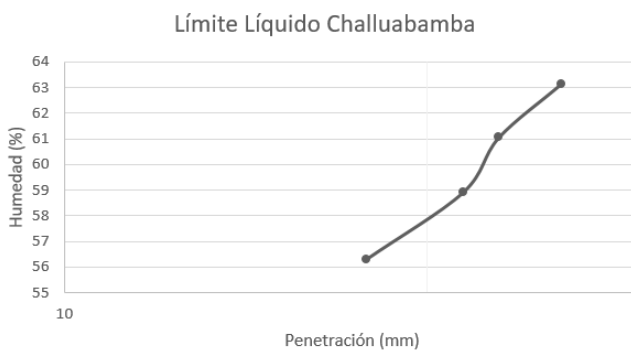
PESO ESPECÍFICO DE LA FASE SÓLIDA			
CHALLUABAMBA			
Temperatura (°C)	Matraz+agua+ suelo (gr) Wa	Wmatraz+agua (gr) Wb	Gs
30	678.5	649.906	2.838
24	680.4	651.945	2.816
20	681.6	653.304	2.790
Wseco (gr) Ws	44.1	Promedio Gs	<u>2.815</u>
γ_W (Kg/m ³)	1000		



LÍMITE LÍQUIDO									
CASAGRANDE									
CHALLUABAMBA									
# Golpes	W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (w)						
44	16.4	10.6	54.72						
36	17.1	10.8	58.33						
28	21.7	13.4	61.94						
20	17.8	10.9	63.30						
15	18.4	11.2	64.29						
<table><tr><th colspan="2">LL CHALLUABAMBA</th></tr><tr><th># Golpes</th><th>Humedad %</th></tr><tr><td>25</td><td>62.5</td></tr></table>				LL CHALLUABAMBA		# Golpes	Humedad %	25	62.5
LL CHALLUABAMBA									
# Golpes	Humedad %								
25	62.5								



LÍMITE LÍQUIDO									
PENETRACIÓN DE CONO									
CHALLUABAMBA									
Penetración mm	W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (ω)						
25.8	27.9	17.1	63.16						
22.9	48.8	30.3	61.06						
21.4	20.5	12.9	58.91						
17.8	23.6	15.1	56.29						
<table><tr><th colspan="2">LL CHALLUABAMBA</th></tr><tr><td>Penetración</td><td>Humedad %</td></tr><tr><td>20 mm</td><td>57.8</td></tr></table>				LL CHALLUABAMBA		Penetración	Humedad %	20 mm	57.8
LL CHALLUABAMBA									
Penetración	Humedad %								
20 mm	57.8								

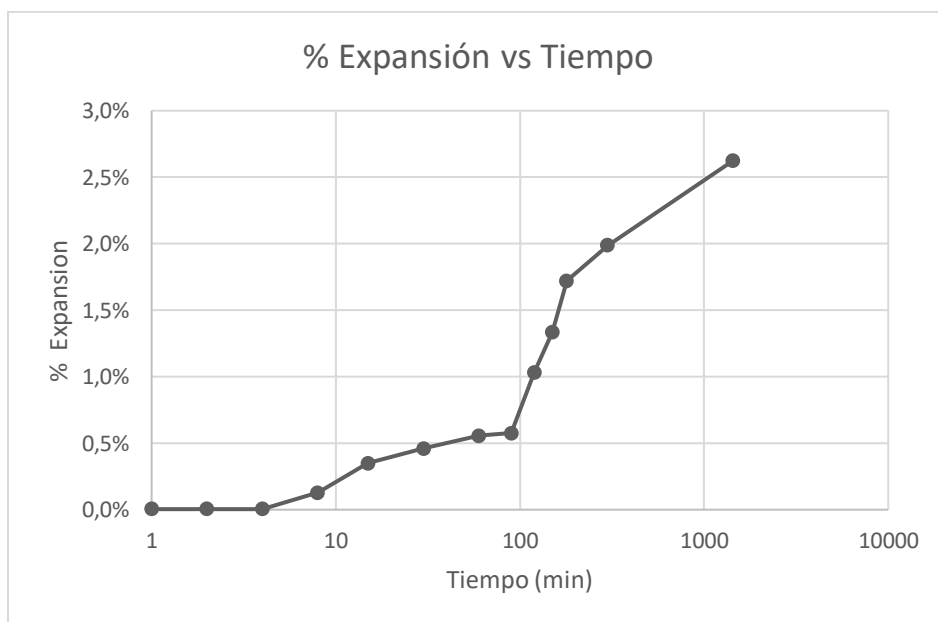


LÍMITE CONTRACCIÓN			
CHALLUABAMBA			
W _{recipiente} (gr)	9.7	V _{recipiente} (cm3)	15.7
W _{recipiente+ hg} (gr)	223.5	Humedad suelo (%)	61.9
W _{recipiente+ suelohumedo} (gr)	34.8	Volumen Pastilla (cm3)	8.1
W _{recipiente+ sueloseco} (gr)	25.2	Volumen Agua (cm3)	7.6
W _{hgdesplazado} (gr)	110.5	LC (%)	12.9

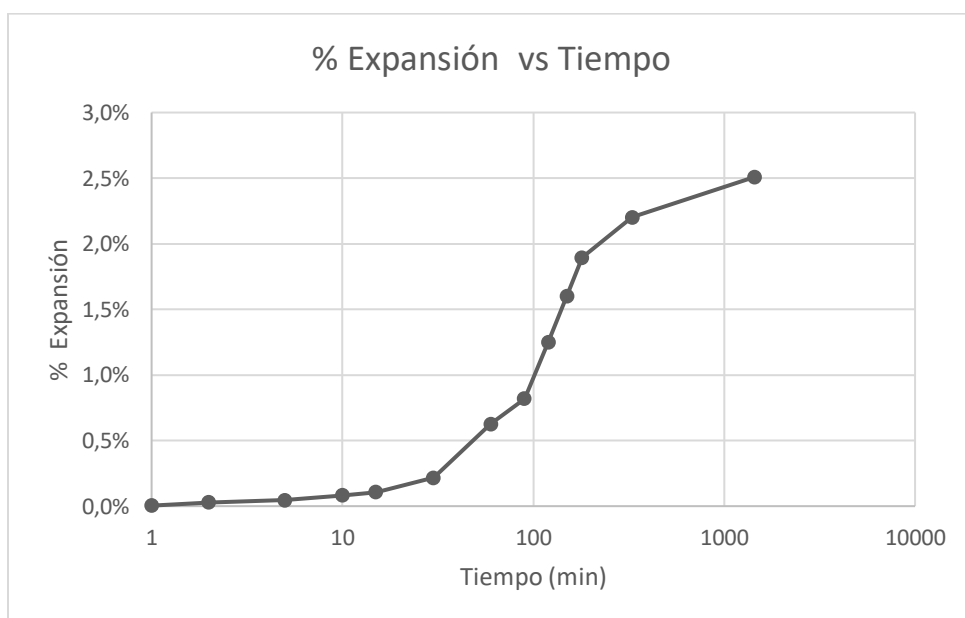
LÍMITE PLÁSTICO		
CHALLUABAMBA		
W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (ω)
2.4	2	20.00
2.5	2.1	19.05
2.5	2	25.00
		21.35

Índice Plástico	Índice Líquido	Actividad
41.15	10.3	1.1

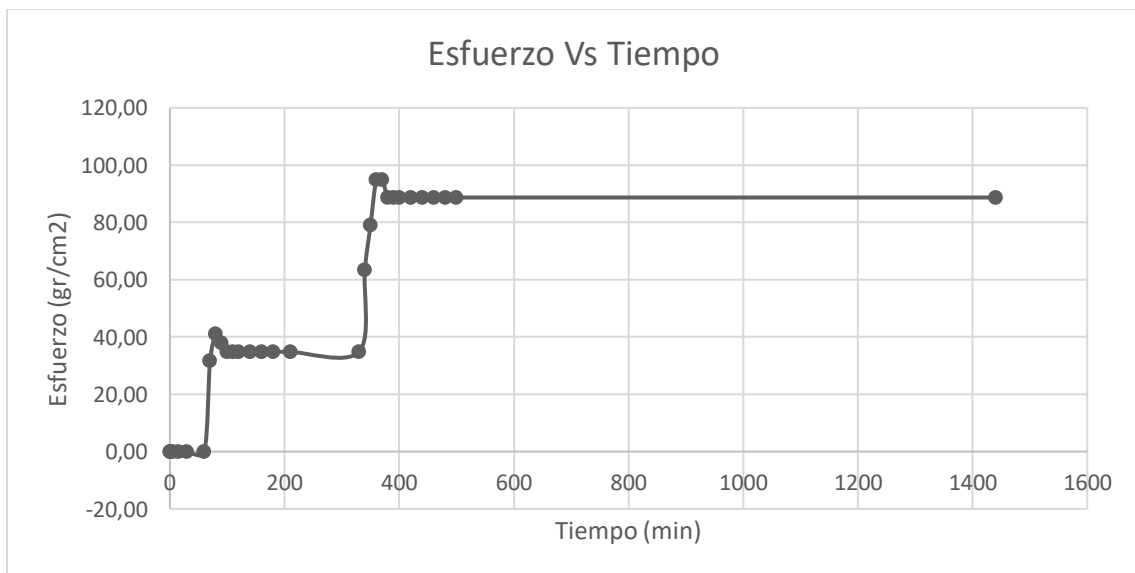
EXPANSIÓN LIBRE						
CHALLUABAMBA M1						
DATOS			Tiempo	DIAL	ΔN	Expansión
h anillo (cm)	2.43		(min)	(0,01 mm)	(1 mm)	(%)
Diámetro (cm)	6.34		0	0	0	0.00%
Wanillo (gr)	115.7		1	0.1	0.001	0.00%
Wsueloantes(gr)	127.4		2	0.1	0.001	0.00%
Wsuelofinal (gr)	137.5		4	0.1	0.001	0.00%
Wsueloseco	97.1		8	3.1	0.031	0.13%
Ss	2.815		15	8.5	0.085	0.35%
			30	11.2	0.112	0.46%
			60	13.5	0.135	0.56%
Variación volumétrica (%)	2.63%		90	14	0.14	0.58%
Volumen final (cm ³)	76.73		120	25.1	0.251	1.03%
CÁLCULOS	Inicial	Final	150	32.4	0.324	1.33%
Humedad (%)	31.20	41.61	180	41.8	0.418	1.72%
Volumen (cm ³)	76.71	76.73	300	48.3	0.483	1.99%
Densidad húmeda (gr/cm ³)	1.66	1.79	1440	63.8	0.638	2.63%
Peso Esp. Seco (gr/cm ³)	1.27	1.27				
Espacios vacíos (e)	1.22	1.22				
Saturación (S)	71.77	95.64				



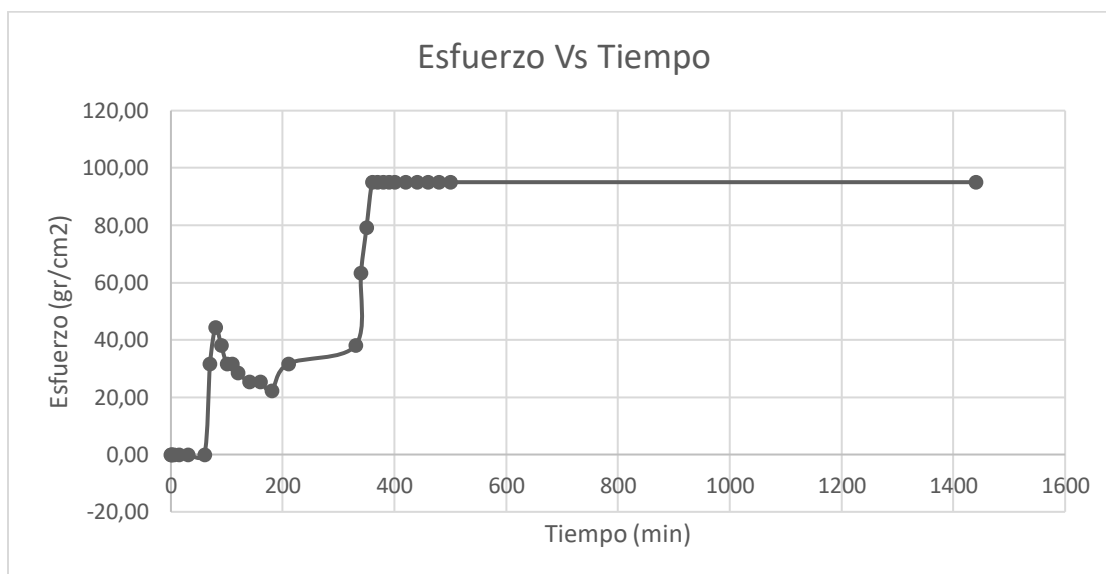
EXPANSIÓN LIBRE						
CHALLUABAMBA M2						
DATOS			Tiempo	DIAL	ΔN	Expansión
h anillo (cm)	2.44		(min)	(0,01 mm)	(1 mm)	(%)
Diámetro (cm)	6.33		0	0	0	0.00%
Wanillo (gr)	112.3		1	0.1	0.001	0.00%
Wsueloantes(gr)	132.1		2	0.7	0.007	0.03%
Wsuelofinal (gr)	142.1		5	1.1	0.011	0.05%
Wsueloseco	100.6		10	2	0.02	0.08%
Ss	2.815		15	2.6	0.026	0.11%
			30	5.3	0.053	0.22%
Variación volumétrica (%)	2.51%		60	15.3	0.153	0.63%
Volumen final (cm3)	76.81		90	20	0.2	0.82%
			120	30.5	0.305	1.25%
CÁLCULOS	Inicial	Final	150	39.1	0.391	1.60%
Humedad (%)	31.31	41.25	180	46.2	0.462	1.89%
Volumen (cm3)	76.79	76.81	330	53.7	0.537	2.20%
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.72	1.85	1440	61.2	0.612	2.51%
Peso Esp. Seco (gr/cm3)	1.31	1.31				
Espacios vacíos (e)	1.15	1.15				
Saturación (S)	76.74	101.05				



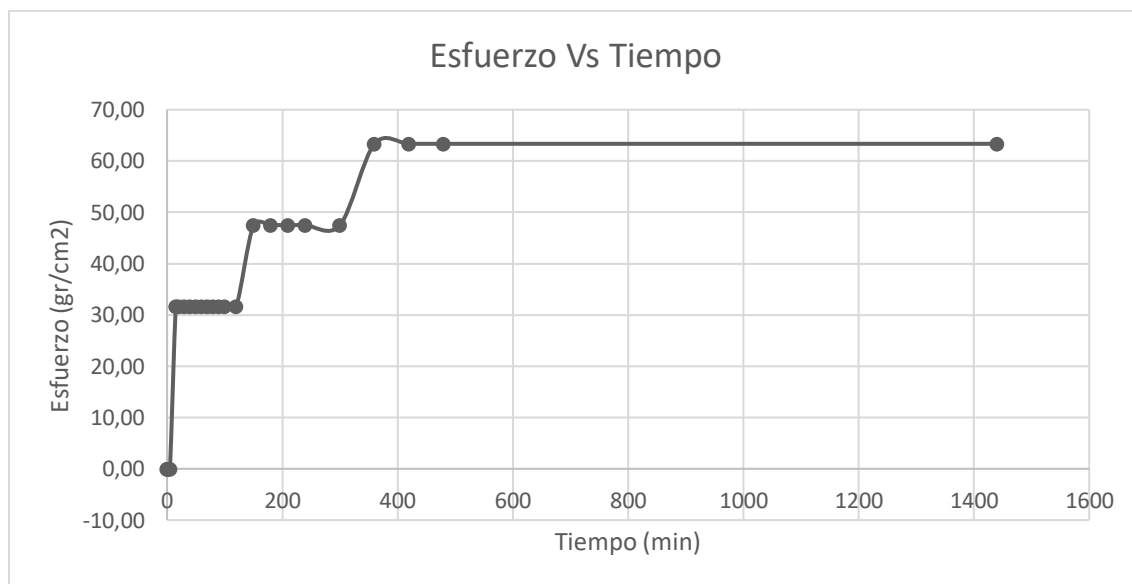
EXPANSIÓN CONTROLADA						
CHALLUABAMBA M1						
DATOS			Tiempo	DIAL	Carga	Esfuerzo
			(min)	(0,01 mm)	(gr)	(gr/cm ²)
h anillo (cm)	2.41		0	0	0	0.00
Diámetro (cm)	6.34		1	0	0	0.00
Wanillo (gr)	106.9		2	0	0	0.00
Wsueloantes(gr)	132.6		5	0	0	0.00
Wsuelofinal (gr)	136.8		15	0	0	0.00
Wsueloseco	96.1		30	0	0	0.00
Ss	2.815		60	1.2	0	0.00
			70	0.5	100	31.68
			80	-0.1	130	41.18
			90	-0.1	120	38.01
			100	-0.1	110	34.84
			110	0	110	34.84
			120	0	110	34.84
			140	0	110	34.84
			160	0	110	34.84
			180	0	110	34.84
			210	0.1	110	34.84
			330	1.8	110	34.84
			340	1.5	200	63.35
			350	1.1	250	79.19
			360	1	300	95.03
			370	1	300	95.03
			380	0	280	88.69
			390	0	280	88.69
			400	0	280	88.69
			420	0	280	88.69
			440	0	280	88.69
			460	0	280	88.69
			480	0	280	88.69
			500	0	280	88.69
			1440	0	280	88.69



EXPANSIÓN CONTROLADA							
CHALLUABAMBA M2							
DATOS			Tiempo	DIAL	Carga	Esfuerzo	
h anillo (cm)	2.3		(min)	(0,01 mm)	(gr)	(gr/cm2)	
Diámetro (cm)	6.32		0	0	0	0.00	
Wanillo (gr)	107.1		1	0	0	0.00	
Wsueloantes(gr)	134.6		2	0	0	0.00	
Wsuelofinal (gr)	137.7		5	0	0	0.00	
Wsueloseco	97.5		15	0	0	0.00	
Ss	2.815		30	0	0	0.00	
			60	1.5	0	0.00	
			70	0.5	100	31.68	
		80	-1	140	44.35		
CÁLCULOS		Inicial	Final	90	-1	120	38.01
Humedad (%)	38.05	41.23	100	-1	100	31.68	
Volumen (cm3)	72.15	72.15	110	-1	100	31.68	
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.87	1.91	120	-1	90	28.51	
Peso Esp. Seco (gr/cm3)	1.35	1.35	140	0.1	80	25.34	
Espacios vacíos (e)	1.08	1.08	160	0.6	80	25.34	
Saturación (S)	98.89	107.15	180	1.9	70	22.17	
			210	1	100	31.68	
			330	2.1	120	38.01	
			340	1.8	200	63.35	
			350	0.8	250	79.19	
			360	-0.2	300	95.03	
			370	-0.1	300	95.03	
			380	-0.1	300	95.03	
			390	0	300	95.03	
			400	0	300	95.03	
			420	0	300	95.03	
			440	0	300	95.03	
			460	0	300	95.03	
			480	0	300	95.03	
			500	0	300	95.03	
			1440	0	300	95.03	



EXPANSION CONTROLADA						
CHALLUABAMBA M3						
DATOS			Tiempo	DIAL	Carga	Esfuerzo
			(min)	(0,01 mm)	(gr)	(gr/cm ²)
h anillo (cm)	2.33		0	0	0	0.00
Diametro (cm)	6.27		1	0	0	0.00
Wanillo (gr)	106.6		2	0	0	0.00
Wsueloantes(gr)	135.3		5	1.2	0	0.00
Wsuelofinal (gr)	138		15	0.4	100	31.68
Wsueloseco	99.2		20	0	100	31.68
Ss	2.815		30	0	100	31.68
			40	0	100	31.68
			50	0	100	31.68
			60	0	100	31.68
CÁLCULOS	Inicial	Final				
Humedad (%)	36.39	39.11	70	0	100	31.68
Volumen (cm ³)	71.94	71.94	80	0	100	31.68
Densidad Humeda (gr/cm ³)	1.88	1.92	90	0	100	31.68
Peso Esp. Seco (gr/cm ³)	1.38	1.38	100	0	100	31.68
Espacios Vacios (e)	1.04	1.04	120	0.8	100	31.68
Saturacion (S)	98.36	105.72	150	0	150	47.51
			180	-0.2	150	47.51
			210	0	150	47.51
			240	0	150	47.51
			300	0.8	150	47.51
			360	0	200	63.35
			420	0	200	63.35
			480	0	200	63.35
			1440	-0.1	200	63.35





Expansión Libre en probeta	
Challuabamba	
Volumen inicial	10
Volumen final	11
% de Expansión	10





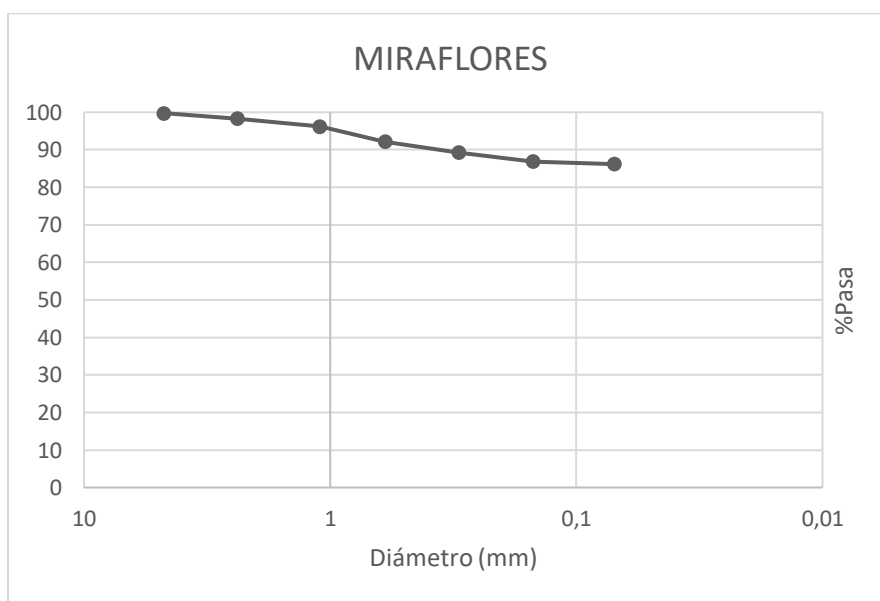
APARATO DE LAMBE					
CHALLUABAMBA					
Condición de humedad		LP = 20,5%		Datos de la probeta	
Cantidad de capas		#	1	Diámetro (mm)	70
Cantidad de golpes		#	5	Área (mm2)	3848.45
Tiempo	Lectura del anillo Dinamométrico	Fuerza	Índice de Expansión	Cambio Volumétrico	
s		N	Mpa		
60	10	106.32	0.028	Crítico	
120	11.8	124.75	0.032	Crítico	
180	13.2	138.94	0.036	Crítico	
240	15	156.98	0.041	Crítico	
300	15.9	165.93	0.043	Crítico	
600	20	205.98	0.054	Crítico	
900	22.1	226.06	0.059	Crítico	
1800	25.8	260.72	0.068	Crítico	
3600	27.1	272.69	0.071	Crítico	
5400	27.7	278.17	0.072	Crítico	
7200	27.9	279.99	0.073	Muy Crítico	

Miraflores

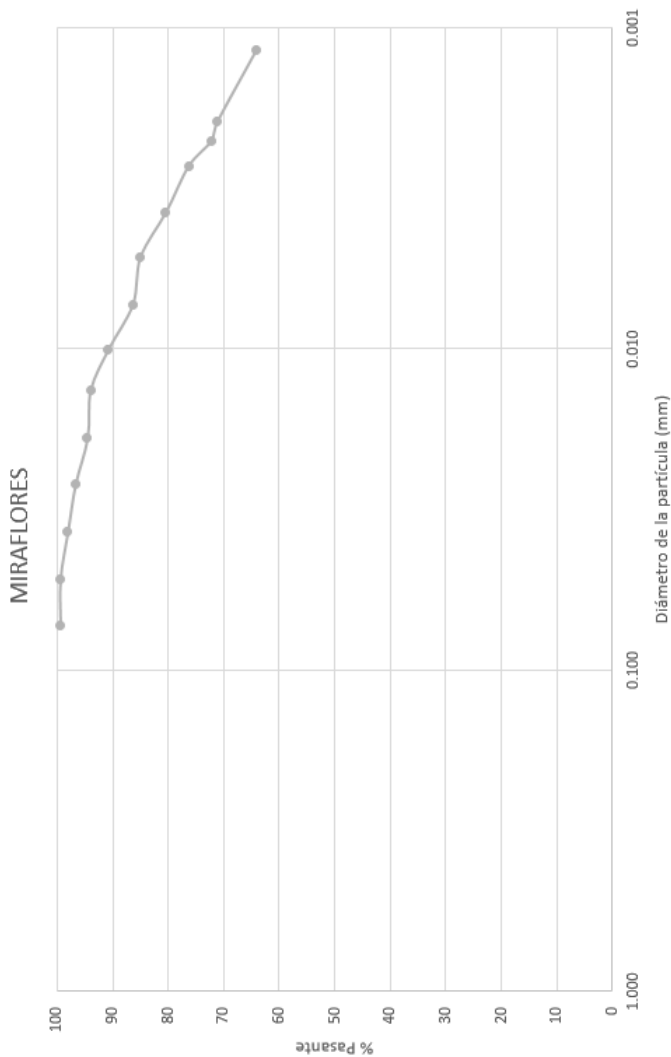
GRANULOMETRÍA					
MIRAFLORES					
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	% Retenido acumulado	%Pasa
N.4	4.75	1.1	1.1	0.2	99.8
N.8	2.38	7.3	8.4	1.7	98.3
N.16	1.1	10.7	19.1	3.8	96.2
N.30	0.6	19.9	39	7.8	92.2
N.50	0.3	14.6	53.6	10.7	89.3
N.100	0.15	11.8	65.4	13.1	86.9
N.200	0.07	3.7	69.1	13.8	86.2
Fondo	0	430.8	499.9	100.0	0.0

Peso Inicial (gr)	500
Peso Final (gr)	499.9
Error (%)	0.02

HUMEDAD				
MIRAFLORES				
Tara	Suelo Humedo (gr)	Suelo seco (gr)	Humedad (%)	Promedio (%)
1	10.2	8.5	20.00	14.42
2	14.9	13.5	10.37	
3	17.5	15.5	12.90	



HIDRÓMETRO																
MIRAFLORES																
t (seg)	15	30	60	120	240	480	900	1800	3600	7200	14400	21600	28800	86400		
R	34	33	32.5	32	31.2	31	29.8	28.5	28	26	24.8	23	22.6	20		
RW	1	0	0	0	0	0	0	0.3	0.3	0	0.3	0	0	0		
T (°C)	18	18	18	18	18	18	18	17.5	17.5	18	18	18	18	18		
CT	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6		
R corregido	37.6	36.6	36.1	35.6	34.8	34.6	33.4	32.1	31.6	29.6	28.4	26.6	26.2	23.6		
Zr (cm)	8.518	8.789	8.925	9.060	9.277	9.331	9.656	10.009	10.144	10.686	11.011	11.499	11.607	12.312		
Zrc (cm)	7.418	7.689	7.825	7.960	8.177	8.231	8.557	8.909	9.044	9.586	9.912	10.399	10.508	11.212		
Coef de viscosidad n	0.00001076	0.00001076	0.00001076	0.00001076	0.00001076	0.00001076	0.00001076	0.0000109	0.0000109	0.00001076	0.00001076	0.00001076	0.00001076	0.00001076		
Yc (corregido)	0.99868	0.99868	0.99868	0.99868	0.99868	0.99868	0.99868	0.99877	0.99877	0.99868	0.99868	0.99868	0.99868	0.99868		
D(mm)	0.0723	0.0521	0.0371	0.0265	0.0190	0.0135	0.0100	0.0073	0.0052	0.0038	0.0027	0.0023	0.0020	0.0012		
%Pasa N	99.4780	99.4780	98.1190	96.7600	94.5856	94.0420	90.7804	86.4395	85.0804	80.4521	76.3752	72.2982	71.2110	64.1443		





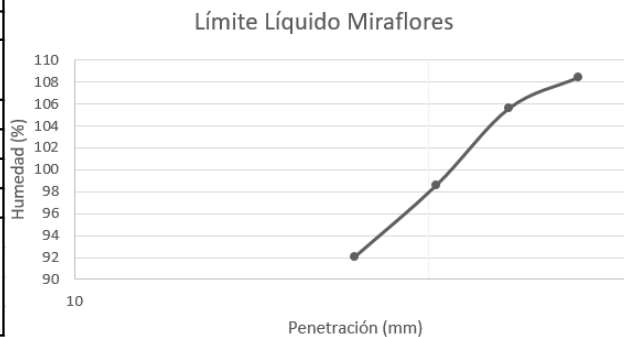
PESO ESPECÍFICO DE LA FASE SÓLIDA			
MIRAFLORES			
Temperatura (°C)	Matraz+agua+ suelo (gr) Wa	Wmatraz+agua (gr) Wb	Gs
30	678.5	649.906	2.850
24	680.4	651.945	2.828
20	681.7	653.304	2.820
Wseco (gr) Ws	44	Promedio Gs	<u>2.832</u>
γ_W (Kg/m ³)	1000		



LÍMITE LÍQUIDO									
CASAGRANDE									
MIRAFLORES									
# Golpes	W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (ω)						
38	13.1	7.2	81.94						
30	13.8	7.5	84.00						
25	17.6	9.34	88.44						
20	13.4	6.98	91.98						
12	15.8	8.1	95.06						
<table><tr><th colspan="2">LL MIRAFLORES</th></tr><tr><th># Golpes</th><th>Humedad %</th></tr><tr><td>25</td><td>88.4</td></tr></table>				LL MIRAFLORES		# Golpes	Humedad %	25	88.4
LL MIRAFLORES									
# Golpes	Humedad %								
25	88.4								



LÍMITE LÍQUIDO									
PENETRACIÓN DE CONO									
MIRAFLORES									
Penetración mm	W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (ω)						
26.8	46.9	22.5	108.44						
23.4	36.6	17.8	105.62						
20.3	28.6	14.4	98.61						
17.3	24.2	12.6	92.06						
<table><tr><th colspan="2">LL MIRAFLORES</th></tr><tr><td>Penetración</td><td>Humedad %</td></tr><tr><td>20 mm</td><td>98</td></tr></table>				LL MIRAFLORES		Penetración	Humedad %	20 mm	98
LL MIRAFLORES									
Penetración	Humedad %								
20 mm	98								

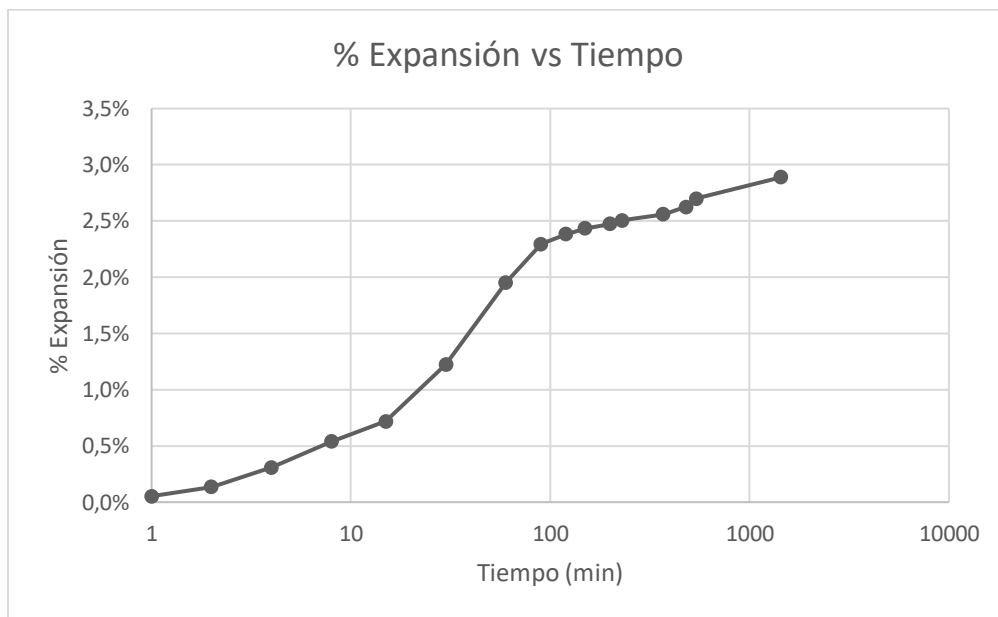


LÍMITE CONTRACCIÓN			
MIRAFLORES			
W _{recipiente} (gr)	9.7	V _{recipiente} (cm3)	16.5
W _{recipiente+ hg} (gr)	234.2	Humedad suelo (%)	88.5
W _{recipiente+ suelohumedo} (gr)	34.2	Volumen Pastilla (cm3)	6.8
W _{recipiente+ sueloseco} (gr)	22.7	Volumen Agua (cm3)	9.7
W _{hgdesplaza do} (gr)	92.2	LC (%)	13.6

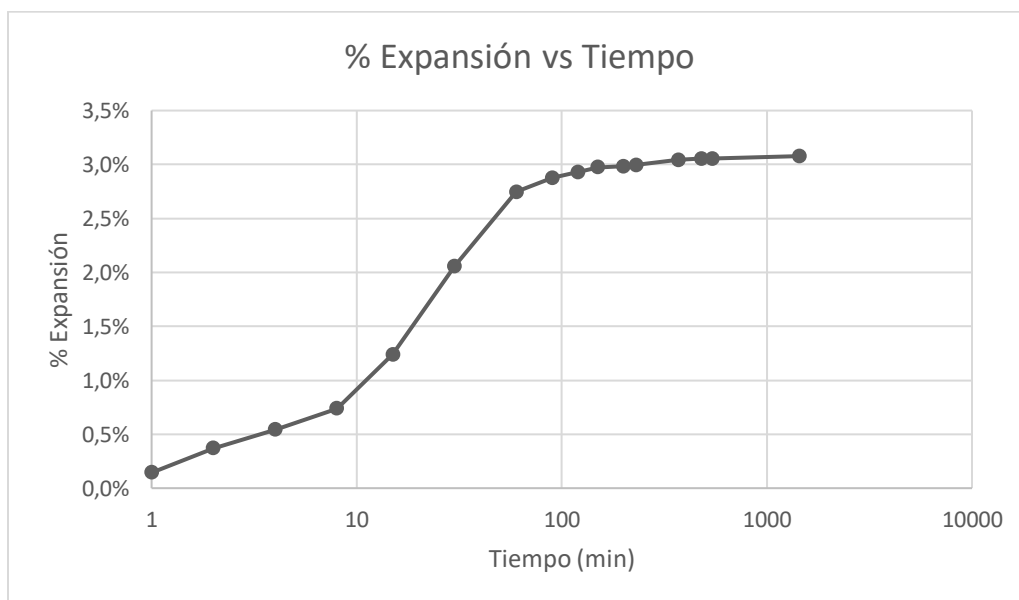
LÍMITE PLÁSTICO		
MIRAFLORES		
W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (ω)
4.7	3.7	27.03
5.1	4	27.50
4.2	3.3	27.27
		27.27

Índice Plástico	Índice Líquido	Actividad
61.13	-20.8	1.0

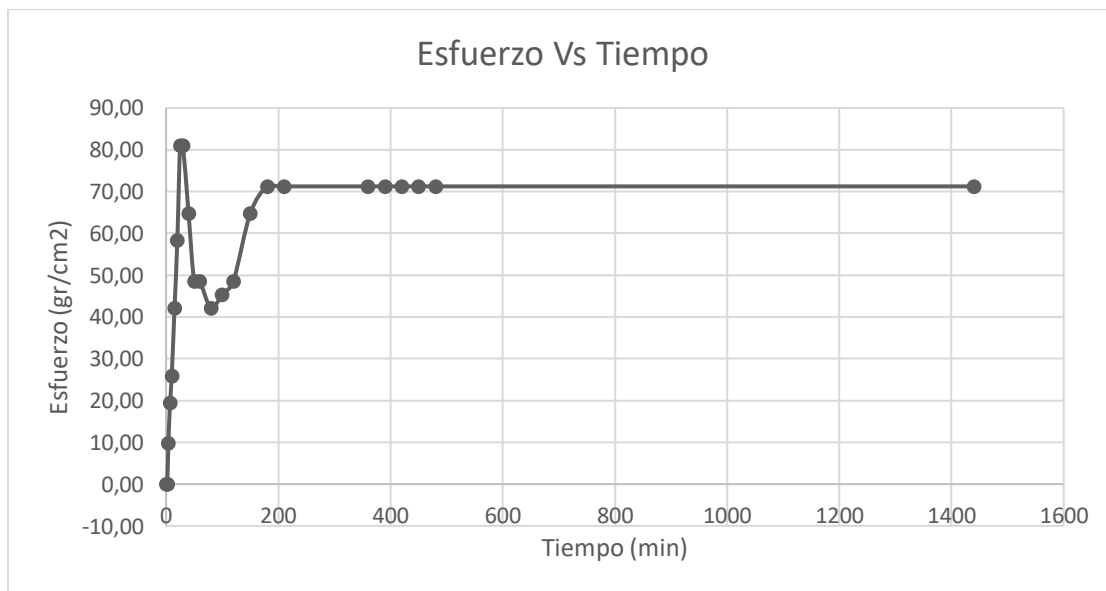
EXPANSIÓN LIBRE						
MIRAFLORES M1						
DATOS			Tiempo	DIAL	ΔN	Expansión
h anillo (cm)	2.43		(min)	(0,01 mm)	(1 mm)	(%)
Diámetro (cm)	6.34		0	0	0	0.00%
Wanillo (gr)	106.5		1	1.3	0.013	0.05%
Wsueloantes(gr)	131.1		2	3.3	0.033	0.14%
Wsuelofinal (gr)	139.3		4	7.5	0.075	0.31%
Wsueloseco	102.6		8	13.1	0.131	0.54%
Ss	2.832		15	17.5	0.175	0.72%
			30	29.8	0.298	1.23%
Variación volumétrica (%)	2.89%		60	47.5	0.475	1.95%
Volumen final (cm3)	76.74		90	55.8	0.558	2.30%
			120	57.9	0.579	2.38%
			150	59.2	0.592	2.44%
			200	60.1	0.601	2.47%
			230	60.9	0.609	2.51%
CÁLCULOS	Inicial	Final				
Humedad (%)	27.78	35.77				
Volumen (cm3)	76.71	76.74				
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.71	1.82				
Peso Esp. Seco (gr/cm3)	1.34	1.34				
Espacios vacíos (e)	1.12	1.12				
Saturación (S)	70.40	90.60				
			1440	70.2	0.702	2.89%



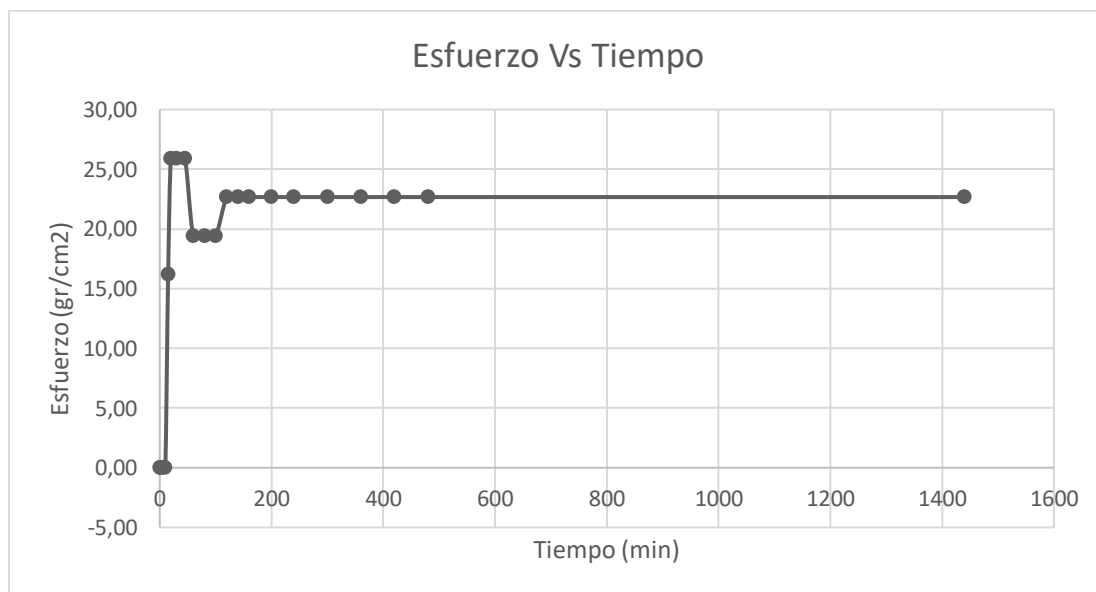
EXPANSIÓN LIBRE						
MIRAFLORES M2						
DATOS			Tiempo	DIAL	ΔN	Expansión
h anillo (cm)	2.44		(min)	(0,01 mm)	(1 mm)	(%)
Diámetro (cm)	6.33		0	0	0	0.00%
Wanillo (gr)	115.7		1	3.5	0.035	0.14%
Wsueloantes(gr)	136.3		2	9	0.09	0.37%
Wsuelofinal (gr)	144		4	13.2	0.132	0.54%
Wsueloseco	109.8		8	18	0.18	0.74%
Ss	2.832		15	30.2	0.302	1.24%
			30	50.2	0.502	2.06%
			60	67	0.67	2.75%
Variación volumétrica (%)	3.08%		90	70.2	0.702	2.88%
Volumen final (cm3)	76.81		120	71.5	0.715	2.93%
			150	72.6	0.726	2.98%
CÁLCULOS	Inicial	Final				
Humedad (%)	24.13	31.15	200	72.8	0.728	2.98%
Volumen (cm3)	76.79	76.81	230	73.1	0.731	3.00%
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.78	1.87	370	74.2	0.742	3.04%
Peso Esp. Seco (gr/cm3)	1.43	1.43	480	74.5	0.745	3.05%
Espacios vacíos (e)	0.98	0.98	540	74.5	0.745	3.05%
Saturación (S)	69.71	89.91	1440	75.1	0.751	3.08%



EXPANSIÓN CONTROLADA						
MIRAFLORES M1						
DATOS			Tiempo	DIAL	Carga	Esfuerzo
h anillo (cm)	2.33		(min)	(0,01 mm)	(gr)	(gr/cm2)
Diámetro (cm)	6.27		0	0	0	0.00
Wanillo (gr)	106.6		2	1	0	0.00
Wsueloantes(gr)	124.7		4	1.8	30	9.72
Wsuelofinal (gr)	133.4		7	1.8	60	19.43
Wsueloseco	101.5		10	2.2	80	25.91
Ss	2.832		15	1.8	130	42.10
			20	2	180	58.30
			25	-1.8	250	80.97
		30	-2	250	80.97	
		40	-2.8	200	64.77	
CÁLCULOS	Inicial	Final	50	-1.8	150	48.58
Humedad (%)	22.86	31.43	60	-1.1	150	48.58
Volumen (cm3)	71.94	71.94	80	0.3	130	42.10
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.73	1.85	100	0.8	140	45.34
Peso Esp. Seco (gr/cm3)	1.41	1.41	120	1	150	48.58
Espacios vacíos (e)	1.01	1.01	150	0.8	200	64.77
Saturación (S)	64.26	88.36	180	0	220	71.25
			210	0	220	71.25
			360	0	220	71.25
			390	0	220	71.25
			420	0	220	71.25
			450	0	220	71.25
			480	0	220	71.25
			1440	0	220	71.25



EXPANSIÓN CONTROLADA						
MIRAFLORES M3						
DATOS			Tiempo	DIAL	Carga	Esfuerzo
			(min)	(0,01 mm)	(gr)	(gr/cm ²)
h anillo (cm)	2.43		0	0	0	0.00
Diámetro (cm)	6.34		1	0	0	0.00
Wanillo (gr)	106.5		2	0	0	0.00
Wsueloantes(gr)	125.2		5	0	0	0.00
Wsuelofinal (gr)	128.6		10	0.8	0	0.00
Wsueloseco	103.7		15	1.5	50	16.19
Ss	2.832		20	0.2	80	25.91
			30	0	80	25.91
			45	-0.5	80	25.91
			60	-0.1	60	19.43
			80	0	60	19.43
			100	0.2	60	19.43
			120	0	70	22.67
			140	0	70	22.67
			160	0	70	22.67
			200	0	70	22.67
			240	0	70	22.67
			300	0	70	22.67
			360	0	70	22.67
			420	0	70	22.67
			480	0	70	22.67
			1440	0	70	22.67
CÁLCULOS		Inicial	Final			
Humedad (%)		20.73	24.01			
Volumen (cm ³)		76.71	76.71			
Densidad húmeda (gr/cm ³)		1.63	1.68			
Peso Esp. Seco (gr/cm ³)		1.35	1.35			
Espacios vacíos (e)		1.10	1.10			
Saturación (S)		53.62	62.10			





Expansión Libre en probeta	
Miraflores	
Volumen inicial	10
Volumen final	15
% de Expansión	50





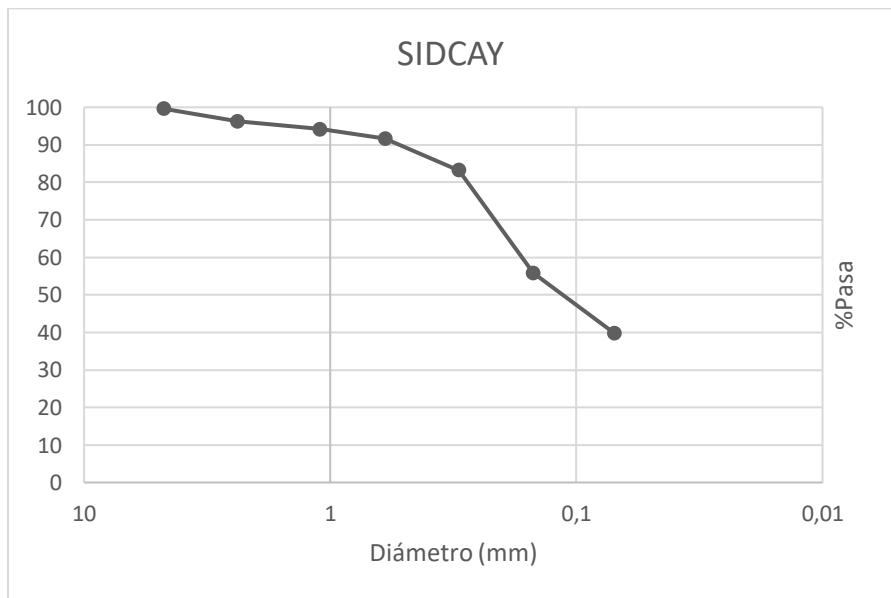
APARATO DE LAMBE					
MIRAFLORES					
Condición de humedad		LP = 27,3%		Datos de la probeta	
Cantidad de capas		#	1	Diámetro (mm)	70
Cantidad de golpes		#	5	Área (mm2)	3848.45
Tiempo	Lectura del anillo Dinamométrico	Fuerza	Índice de Expansión	Cambio Volumétrico	
s		N	Mpa		
60	5	54.00	0.014	Marginal	
120	6.2	66.71	0.017	Marginal	
180	6.8	73.03	0.019	Marginal	
240	7.4	79.32	0.021	Marginal	
300	8.2	87.68	0.023	Marginal	
600	10.3	109.41	0.028	Marginal	
900	12.5	131.86	0.034	Crítico	
1800	16.5	171.86	0.045	Crítico	
3600	24.8	251.44	0.065	Crítico	
5400	28.2	282.72	0.073	Crítico	
7200	30.5	303.44	0.079	Muy Crítico	

Sidcay

GRANULOMETRÍA					
SIDCAY					
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	% Retenido acumulado	%Pasa
N.4	4.75	2	2	0.4	99.6
N.8	2.38	16.9	18.9	3.8	96.2
N.16	1.1	10	28.9	5.8	94.2
N.30	0.6	12.9	41.8	8.4	91.6
N.50	0.3	42.1	83.9	16.8	83.2
N.100	0.15	136.9	220.8	44.2	55.8
N.200	0.07	80.3	301.1	60.2	39.8
Fondo	0	198.7	499.8	100.0	0.0

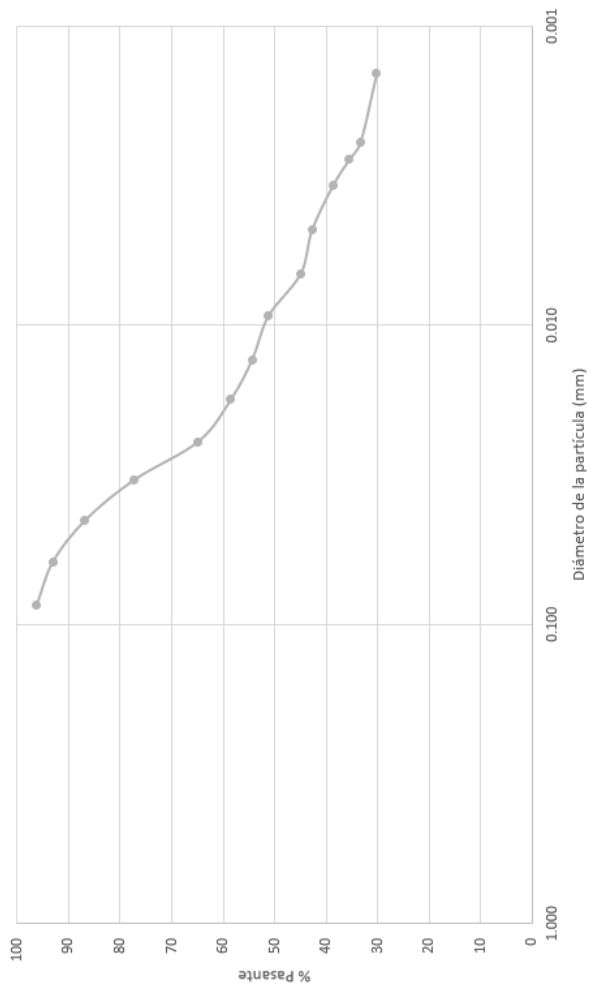
Peso Inicial (gr)	500
Peso Final (gr)	499.8
Error (%)	0.04

HUMEDAD				
SIDCAY				
Tara	Suelo Humedo (gr)	Suelo seco (gr)	Humedad (%)	Promedio (%)
1	18.2	15.3	18.95	19.81
2	15.3	12.9	18.60	
3	11.7	9.6	21.88	



HIDRÓMETRO																
SIDCAY																
t (seg)	15	30	60	120	240	480	900	1800	3600	7200	14400	21600	28800	86400		
R	27	26	24	21	17	15	14	13	11	10	9	8	7	6		
RW	0	0	0	0	0	0	0.3	0.3	0.3	0	0.3	0.3	0	0		
T (°C)	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17.5	18	18	17		
CT	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6		
R corregido	30.6	29.6	27.6	24.6	20.6	18.6	17.6	16.6	14.6	13.6	12.6	11.6	10.6	9.6		
Zr (cm)	10.415	10.686	11.228	12.041	13.125	13.667	13.938	14.209	14.751	15.022	15.293	15.564	15.835	16.106		
Zrc (cm)	9.315	9.586	10.128	10.941	12.025	12.567	12.838	13.109	13.651	13.922	14.193	14.464	14.735	15.006		
Coef de viscosidad n	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.0000109	0.00001076	0.00001076	0.00001104		
yc (corregido)	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99886	0.99877	0.99868	0.99868	0.99886		
D(mm)	0.0863	0.0619	0.0450	0.0331	0.0245	0.0177	0.0131	0.0093	0.0067	0.0048	0.0034	0.0028	0.0024	0.0014		
%Pasa N	96.2891	93.1424	86.8490	77.4089	64.8221	58.5287	54.4380	51.2913	44.9979	42.7952	38.7010	35.5513	33.3491	30.2084		

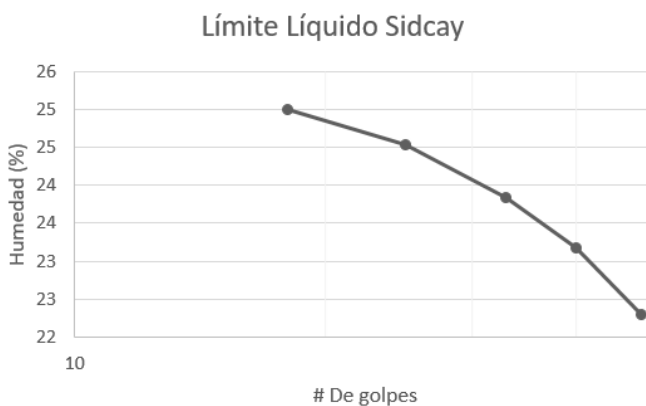
SIDCAY



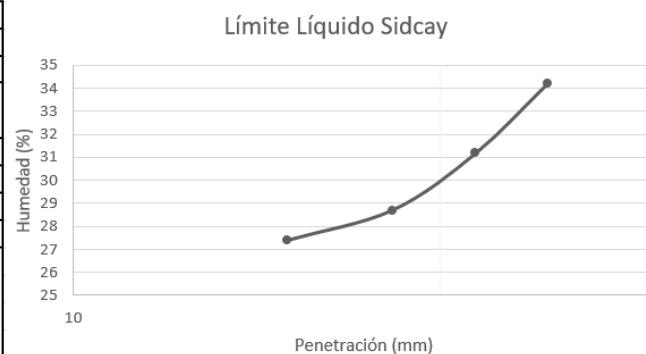


PESO ESPECÍFICO DE LA FASE SÓLIDA			
SIDCAY			
Temperatura (°C)	Matraz+agua+ suelo (gr) W_a	Wmatraz+agua (gr) W_b	Gs
30	683.2	649.906	2.683
25	684.7	651.605	2.660
21	685.8	652.964	2.628
Wseco (gr) W_s	53	Promedio Gs	<u>2.657</u>
γ_w (Kg/m ³)	1000		

LÍMITE LÍQUIDO									
CASAGRANDE									
SIDCAY									
# Golpes	W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (ω)						
48	15.3	12.51	22.30						
40	18.6	15.1	23.18						
33	14.7	11.87	23.84						
25	19.8	15.9	24.53						
18	16	12.8	25.00						
<table><tr><th colspan="2">LL SIDCAY</th></tr><tr><th># Golpes</th><th>Humedad %</th></tr><tr><td>25</td><td>24.5</td></tr></table>				LL SIDCAY		# Golpes	Humedad %	25	24.5
LL SIDCAY									
# Golpes	Humedad %								
25	24.5								



LÍMITE LÍQUIDO									
PENETRACIÓN DE CONO									
SIDCAY									
Penetración mm	W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (ω)						
24.5	61.6	45.9	34.20						
21.4	34.5	26.3	31.18						
18.3	28.7	22.3	28.70						
15	21.4	16.8	27.38						
<table><tr><th colspan="2">LL SIDCAY</th></tr><tr><td>Penetración</td><td>Humedad %</td></tr><tr><td>20 mm</td><td>30</td></tr></table>				LL SIDCAY		Penetración	Humedad %	20 mm	30
LL SIDCAY									
Penetración	Humedad %								
20 mm	30								

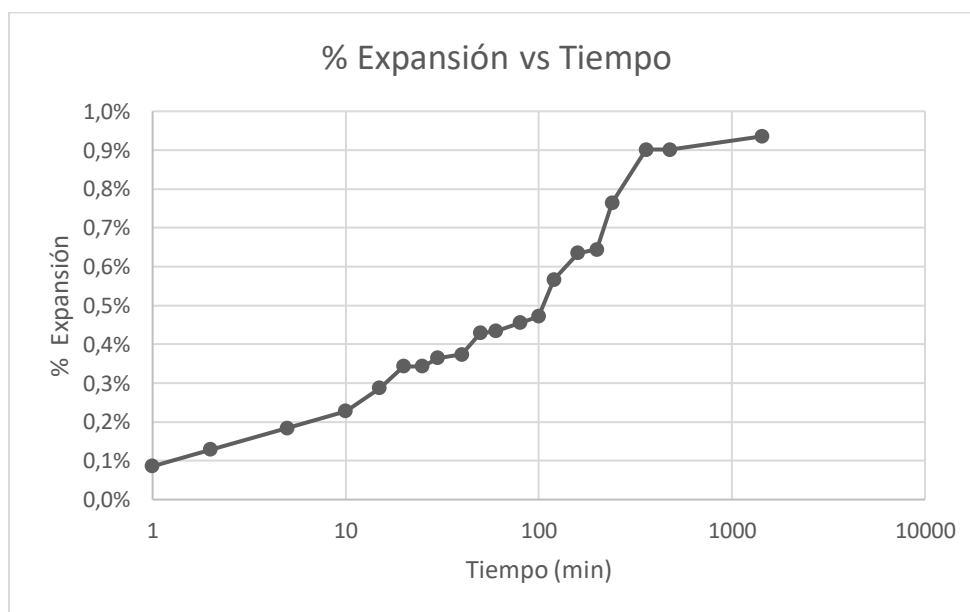


LÍMITE CONTRACCIÓN			
SIDCAY			
W _{recipiente} (gr)	9.7	V _{recipiente} (cm3)	16.8
W _{recipiente+ hg} (gr)	238.3	Humedad suelo (%)	25.0
W _{recipiente+ suelohumedo} (gr)	44.2	Volumen Pastilla (cm3)	15.4
W _{recipiente+ sueloseco} (gr)	37.3	Volumen Agua (cm3)	1.4
W _{hgdesplaza do} (gr)	209.3	LC (%)	19.9

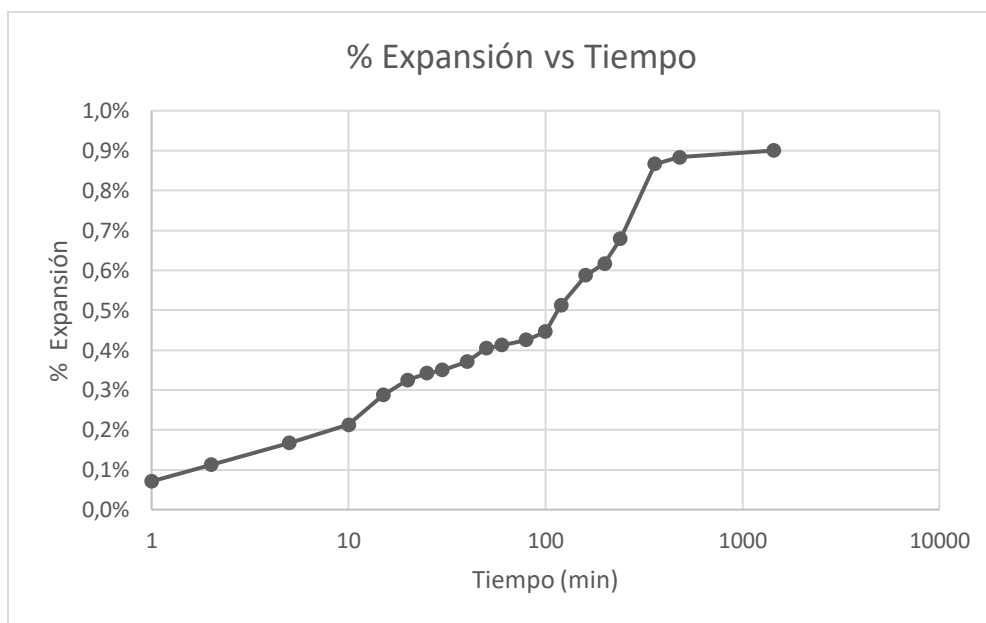
LÍMITE PLÁSTICO		
SIDCAY		
W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (ω)
2.8	2.5	12.00
3.2	2.8	14.29
4.4	3.9	12.82
		13.04

Índice Plástico	Índice Líquido	Actividad
11.46	59.0	0.9

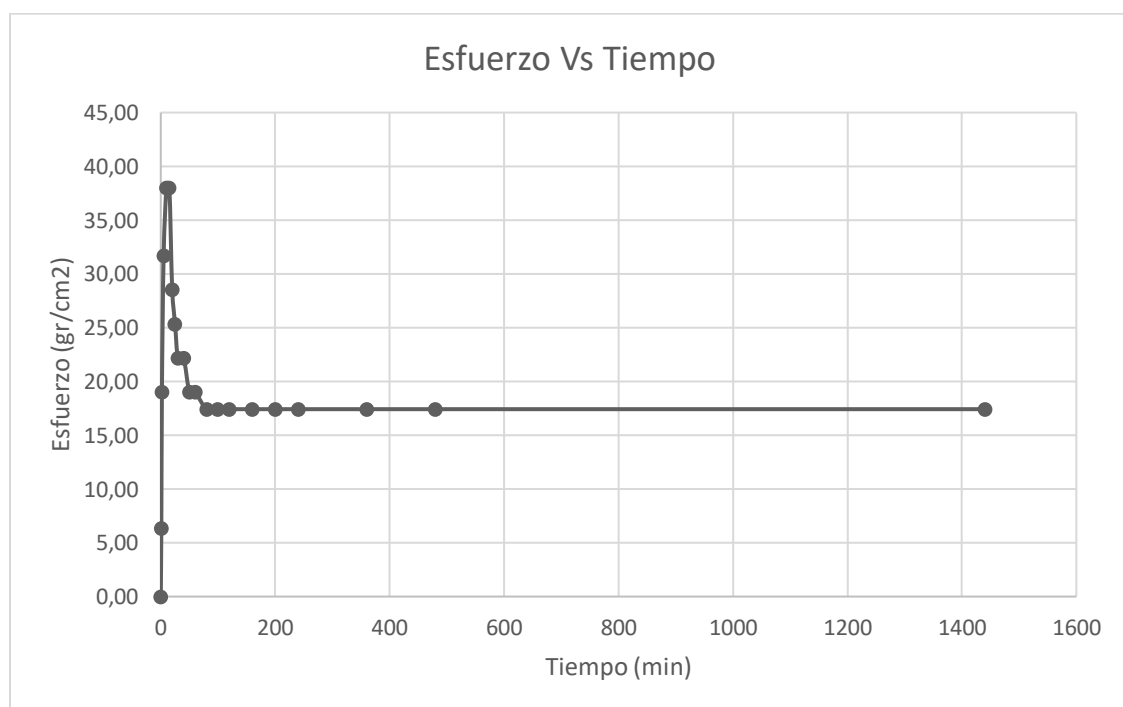
EXPANSIÓN LIBRE						
SIDCAY M1						
DATOS			Tiempo	DIAL	ΔN	Expansión
h anillo (cm)	2.33		(min)	(0,01 mm)	(1 mm)	(%)
Diámetro (cm)	6.27		0	0	0	0.00%
Wanillo (gr)	106.6		1	2	0.02	0.09%
Wsueloantes(gr)	124.5		2	3	0.03	0.13%
Wsuelofinal (gr)	137.3		5	4.3	0.043	0.18%
Wsueloseco	105.6		10	5.3	0.053	0.23%
Ss	2.657		15	6.7	0.067	0.29%
			20	8	0.08	0.34%
			25	8	0.08	0.34%
Variación volumétrica (%)	0.94%		30	8.5	0.085	0.36%
Volumen final (cm3)	71.95		40	8.7	0.087	0.37%
			50	10	0.1	0.43%
			60	10.1	0.101	0.43%
			80	10.6	0.106	0.45%
			100	11	0.11	0.47%
CÁLCULOS	Inicial	Final	120	13.2	0.132	0.57%
Humedad (%)	17.90	30.02	160	14.8	0.148	0.64%
Volumen (cm3)	71.94	71.95	200	15	0.15	0.64%
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.73	1.91	240	17.8	0.178	0.76%
Peso Esp. Seco (gr/cm3)	1.47	1.47	360	21	0.21	0.90%
Espacios vacíos (e)	0.81	0.81	480	21	0.21	0.90%
Saturación (S)	58.70	98.43	1440	21.8	0.218	0.94%



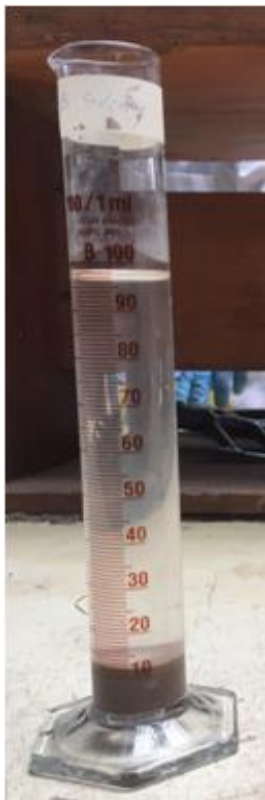
EXPANSIÓN LIBRE						
SIDCAY M2						
DATOS			Tiempo	DIAL	ΔN	Expansión
h anillo (cm)	2.4		(min)	(0,01 mm)	(1 mm)	(%)
Diámetro (cm)	6.32		0	0	0	0.00%
Wanillo (gr)	112.3		1	1.7	0.017	0.07%
Wsueloantes(gr)	125.6		2	2.7	0.027	0.11%
Wsuelofinal (gr)	138.7		5	4	0.04	0.17%
Wsueloseco	105		10	5.1	0.051	0.21%
Ss	2.657		15	6.9	0.069	0.29%
			20	7.8	0.078	0.33%
			25	8.2	0.082	0.34%
			30	8.4	0.084	0.35%
			40	8.9	0.089	0.37%
			50	9.7	0.097	0.40%
			60	9.9	0.099	0.41%
			80	10.2	0.102	0.43%
			100	10.7	0.107	0.45%
			120	12.3	0.123	0.51%
			160	14.1	0.141	0.59%
			200	14.8	0.148	0.62%
			240	16.3	0.163	0.68%
			360	20.8	0.208	0.87%
			480	21.2	0.212	0.88%
			1440	21.6	0.216	0.900%
Variación volumétrica (%)	0.90%					
Volumen final (cm3)	75.30					
CÁLCULOS	Inicial	Final				
Humedad (%)	19.62	32.10				
Volumen (cm3)	75.29	75.30				
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.67	1.84				
Peso Esp. Seco (gr/cm3)	1.39	1.39				
Espacios vacíos (e)	0.91	0.91				
Saturación (S)	57.59	94.19				



EXPANSIÓN CONTROLADA						
SIDCAY M1						
DATOS			Tiempo	DIAL	Carga	Esfuerzo
h anillo (cm)	2.43		(min)	(0,01 mm)	(gr)	(gr/cm2)
Diámetro (cm)	6.34		0	0	0	0.00
Wanillo (gr)	106.5		1	2.5	20	6.34
Wsueloantes(gr)	128.7		2	2.9	60	19.01
Wsuelofinal (gr)	152.1		5	2.3	100	31.68
Wsueloseco	119.3		10	0.5	120	38.01
Ss	2.657		15	-0.7	120	38.01
			20	-0.5	90	28.51
			25	-0.5	80	25.34
CÁLCULOS	Inicial	Final	30	-0.3	70	22.17
Humedad (%)	7.88	27.49	40	-0.3	70	22.17
Volumen (cm3)	76.71	76.71	50	-0.2	60	19.01
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.68	1.98	60	-0.1	60	19.01
Peso Esp. Seco (gr/cm3)	1.56	1.56	80	0	55	17.42
Espacios vacíos (e)	0.71	0.71	100	0	55	17.42
Saturación (S)	29.55	103.10	120	0	55	17.42
			160	0	55	17.42
			200	0	55	17.42
			240	0	55	17.42
			360	0	55	17.42
			480	0	55	17.42
			1440	0	55	17.42



Expansión Libre en probeta	
Sidcay	
Volumen inicial	10
Volumen final	12
% de Expansión	20

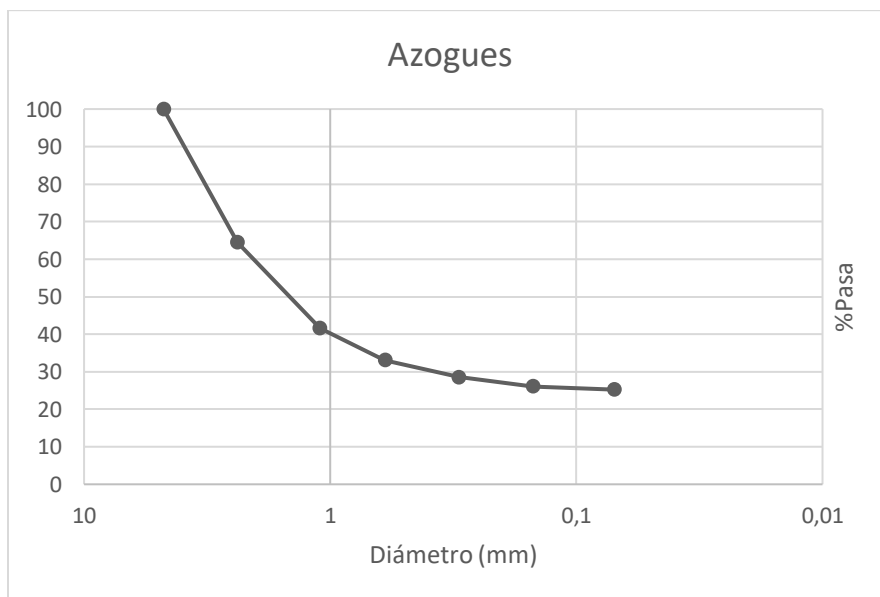




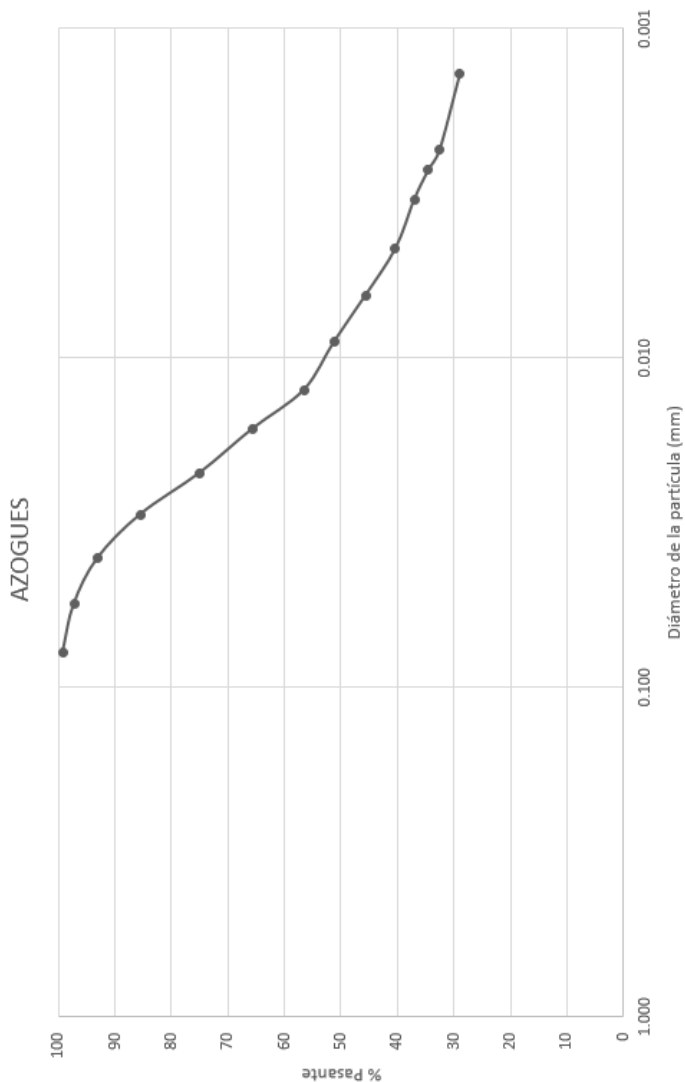
APARATO DE LAMBE					
SIDCAY					
Condición de humedad		LP = 13,0%		Datos de la probeta	
Cantidad de capas		#	1	Diámetro (mm)	70
Cantidad de golpes		#	5	Área (mm2)	3848.45
Tiempo	Lectura del anillo Dinamométrico	Fuerza	Índice de Expansión	Cambio Volumétrico	
s		N	Mpa		
60	4	43.3297	0.011	Marginal	
120	4	43.3297	0.011	Marginal	
180	4	43.3297	0.011	Marginal	
240	4	43.3297	0.011	Marginal	
300	4	43.3297	0.011	Marginal	
600	4	43.3297	0.011	Marginal	
900	4	43.3297	0.011	Marginal	
1800	4	43.3297	0.011	Marginal	
3600	4	43.3297	0.011	Marginal	
5400	4	43.3297	0.011	Marginal	
7200	4	43.3297	0.011	Marginal	

Azogues

GRANULOMETRÍA											
AZOGUES											
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	% Retenido acumulado	%Pasa						
N.4	4.75	0.3	0.3	0.1	99.9						
N.8	2.38	177.2	177.5	35.5	64.5						
N.16	1.1	114.3	291.8	58.4	41.6						
N.30	0.6	42.8	334.6	66.9	33.1						
N.50	0.3	22.4	357	71.4	28.6						
N.100	0.15	12.6	369.6	73.9	26.1						
N.200	0.07	4.2	373.8	74.8	25.2						
Fondo	0	126.1	499.9	100.0	0.0						
<table><tr><td>Peso Inicial (gr)</td><td>500</td></tr><tr><td>Peso Final (gr)</td><td>499.9</td></tr><tr><td>Error (%)</td><td>0.02</td></tr></table>						Peso Inicial (gr)	500	Peso Final (gr)	499.9	Error (%)	0.02
Peso Inicial (gr)	500										
Peso Final (gr)	499.9										
Error (%)	0.02										
HUMEDAD											
AZOGUES											
Tara	Suelo Humedo (gr)	Suelo seco (gr)	Humedad (%)	Promedio (%)							
1	15.9	13.4	18.66	18.64							
2	17.3	14.5	19.31								
3	18.4	15.6	17.95								



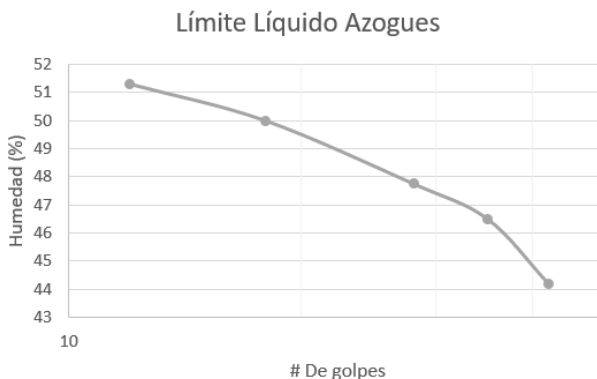
HIDRÓMETRO																
AZOGUES																
t (seg)	15	30	60	120	240	480	900	1800	3600	7200	14400	21600	28800	86400		
R	32.5	31.8	30.3	27.6	23.8	20.5	17.2	15	13	11.1	9.7	8.8	8.1	6.8		
RW	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0		
T (°C)	16	16	16	16	16	16	16	17	17	17	18	19	19	19		
CT	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6		
R corregido	36.1	35.4	33.9	31.2	27.4	24.1	20.8	18.6	16.6	14.7	13.3	12.4	11.7	10.4		
Zr (cm)	8.925	9.114	9.521	10.252	11.282	12.177	13.071	13.667	14.209	14.724	15.103	15.347	15.537	15.889		
Zrc (cm)	7.825	8.015	8.421	9.153	10.183	11.077	11.971	12.567	13.109	13.624	14.004	14.248	14.437	14.790		
Coef de viscosidad n	0.00001133	0.00001133	0.00001133	0.00001133	0.00001133	0.00001133	0.00001133	0.00001104	0.00001104	0.00001104	0.00001076	0.0000105	0.0000105	0.0000105		
Yc (corregido)	0.99903	0.99903	0.99903	0.99903	0.99903	0.99903	0.99903	0.99886	0.99886	0.99886	0.99868	0.99849	0.99849	0.99849		
D(mm)	0.0784	0.0561	0.0407	0.0300	0.0224	0.0165	0.0125	0.0090	0.0065	0.0047	0.0033	0.0027	0.0023	0.0014		
%Pasa N	99.1582	97.2085	93.0304	85.5100	74.9257	65.7341	56.5425	51.2416	45.6718	40.3806	37.0321	34.5196	32.5709	28.9519		



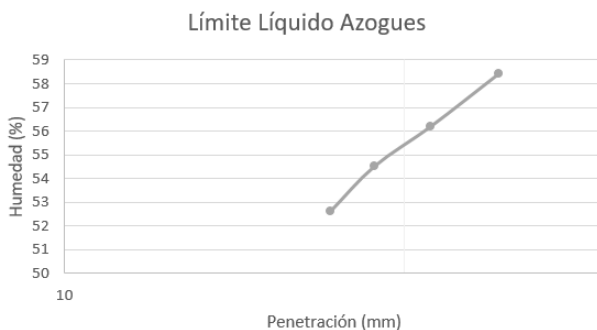


PESO ESPECÍFICO DE LA FASE SÓLIDA			
AZOGUES			
Temperatura (°C)	Matraz+agua+ suelo (gr) Wa	Wmatraz+agua (gr) Wb	Gs
30	683.5	649.906	2.743
24	685.4	651.945	2.727
20	686.7	653.304	2.721
Wseco (gr) Ws	52.8	Promedio Gs	<u>2.730</u>
γ_W (Kg/m ³)	1000		

LÍMITE LÍQUIDO									
CASAGRANDE									
AZOGUES									
# Golpes	W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (ω)						
42	25.2	17.5	44.20						
35	29.3	20	46.50						
28	19.8	13.4	47.76						
18	23.7	15.8	50.00						
12	18.2	12	51.30						
<table><tr><th colspan="2">LL AZOGUES</th></tr><tr><th># Golpes</th><th>Humedad %</th></tr><tr><td>25</td><td>48.4</td></tr></table>				LL AZOGUES		# Golpes	Humedad %	25	48.4
LL AZOGUES									
# Golpes	Humedad %								
25	48.4								



LÍMITE LÍQUIDO									
PENETRACIÓN DE CONO									
AZOGUES									
Penetración mm	W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (ω)						
25.7	44.2	27.9	58.42						
20	45.3	29	56.21						
18.9	32.6	21.1	54.50						
16.9	49.9	32.7	52.60						
<table><tr><th colspan="2">LL AZOGUES</th></tr><tr><td>Penetración</td><td>Humedad %</td></tr><tr><td>20 mm</td><td>56.2</td></tr></table>				LL AZOGUES		Penetración	Humedad %	20 mm	56.2
LL AZOGUES									
Penetración	Humedad %								
20 mm	56.2								

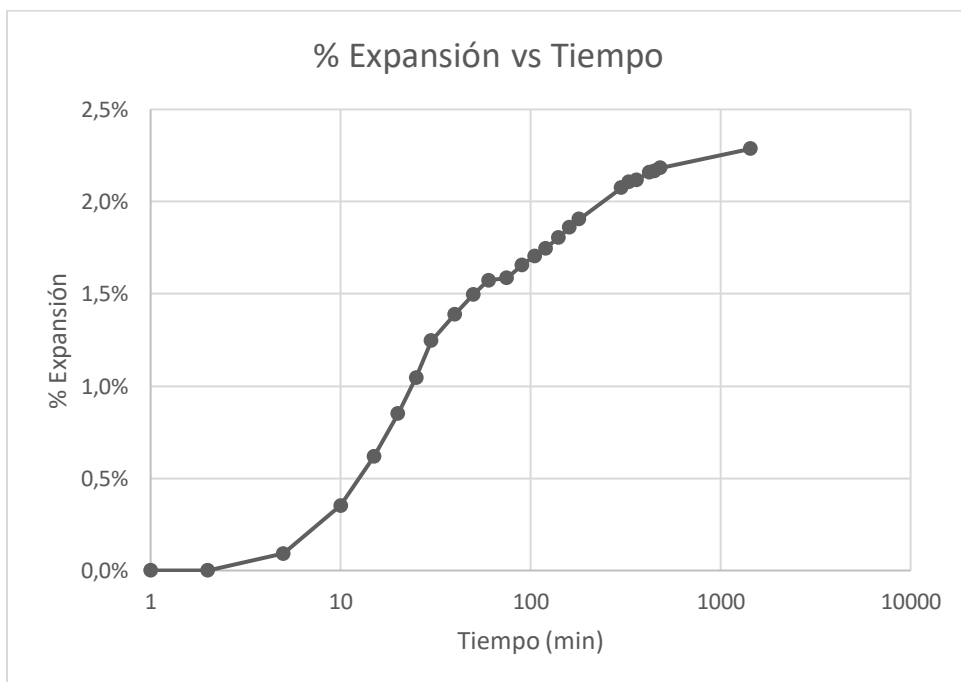


LÍMITE CONTRACCIÓN			
AZOGUES			
W _{recipiente} (gr)	24	V _{recipiente} (cm3)	15.8
W _{recipiente+ hg} (gr)	238.3	Humedad suelo (%)	46
W _{recipiente+ suelohumedo} (gr)	52	Volumen Pastilla (cm3)	10.4
W _{recipiente+ sueloseco} (gr)	43.2	Volumen Agua (cm3)	5.3
W _{hgdesplazado} (gr)	141.8	LC (%)	18.1

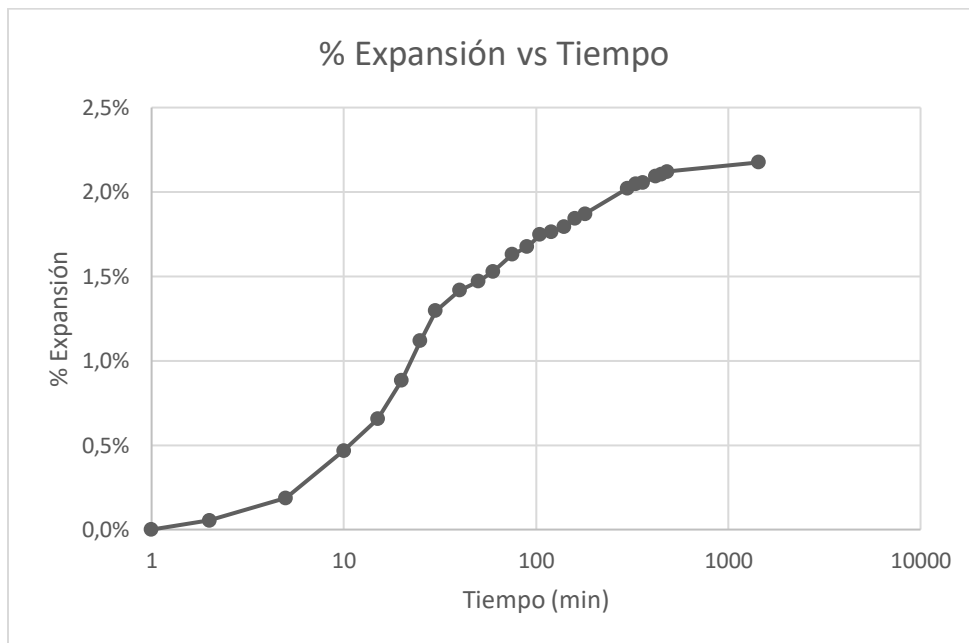
LÍMITE PLÁSTICO		
AZOGUES		
W _{suelohumedo} (gr.)	W _{sueloseco} (gr.)	Humedad (ω)
5.5	3.9	41.03
6	4.5	33.33
5.9	4.4	34.09
		36.15

Índice Plástico	Índice Líquido	Actividad
12.25	-196.3	1.5

EXPANSIÓN LIBRE						
AZOGUES M1						
DATOS			Tiempo	DIAL	ΔN	Expansión
h anillo (cm)	2.41		(min)	(0,01 mm)	(1 mm)	(%)
Diámetro (cm)	6.34		0	0	0	0.00%
Wanillo (gr)	106.9		1	0	0	0.00%
Wanillosueloantes(gr)	142.8		2	0	0	0.00%
Wanillosuelofinal (gr)	150.3		5	2.2	0.022	0.09%
Wsueloseco	118.8		10	8.5	0.085	0.35%
Ss	2.73		15	14.9	0.149	0.62%
			20	20.5	0.205	0.85%
			25	25.2	0.252	1.05%
Variación volumétrica (%)	2.29%		30	30	0.3	1.24%
Volumen Final (cm3)	76.10		40	33.5	0.335	1.39%
			50	36.1	0.361	1.50%
			60	37.9	0.379	1.57%
			75	38.2	0.382	1.59%
			90	39.9	0.399	1.66%
CÁLCULOS	Inicial	Final				
Humedad (%)	20.20	26.52	105	41.1	0.411	1.71%
Volumen (cm3)	76.08	76.10	120	42.1	0.421	1.75%
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.88	1.98	140	43.5	0.435	1.80%
Peso Esp. Seco (gr/cm3)	1.56	1.56	160	44.8	0.448	1.86%
Espacios vacíos (e)	0.75	0.75	180	45.9	0.459	1.90%
Saturación (S)	73.70	96.67	300	50	0.5	2.07%
			330	50.8	0.508	2.11%
			360	51	0.51	2.12%
			420	52	0.52	2.16%
			450	52.2	0.522	2.17%
			480	52.6	0.526	2.18%
			1440	55.1	0.551	2.29%

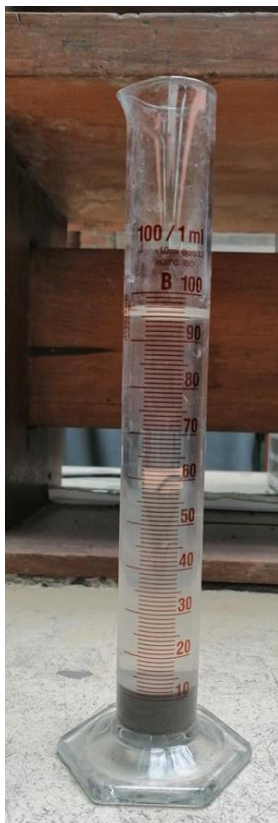


EXPANSIÓN LIBRE						
AZOGUES M2						
DATOS			Tiempo	DIAL	ΔN	Expansión
h anillo (cm)	2.4		(min)	(0,01 mm)	(1 mm)	(%)
Diámetro (cm)	6.32		0	0	0	0.00%
Wanillo (gr)	112.3		1	0	0	0.00%
Wanillo + sueloantes(gr)	141.8		2	1.3	0.013	0.05%
Wanillo+ suelofinal (gr)	145.6		5	4.5	0.045	0.19%
Wsueloseco	114.2		10	11.2	0.112	0.47%
Ss	2.73		15	15.7	0.157	0.65%
			20	21.2	0.212	0.88%
			25	26.8	0.268	1.12%
Variación volumétrica (%)	2.18%		30	31.1	0.311	1.30%
Volumen final (cm3)	75.31		40	34	0.34	1.42%
			50	35.3	0.353	1.47%
			60	36.7	0.367	1.53%
			75	39.1	0.391	1.63%
CÁLCULOS	Inicial	Final	90	40.2	0.402	1.68%
Humedad (%)	24.17	27.50	105	41.9	0.419	1.75%
Volumen (cm3)	75.29	75.31	120	42.3	0.423	1.76%
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.88	1.93	140	43	0.43	1.79%
Peso Esp. Seco (gr/cm3)	1.52	1.52	160	44.2	0.442	1.84%
Espacios vacíos (e)	0.80	0.80	180	44.9	0.449	1.87%
Saturación (S)	82.49	93.80	300	48.5	0.485	2.02%
			330	49.1	0.491	2.05%
			360	49.3	0.493	2.05%
			420	50.2	0.502	2.09%
			450	50.5	0.505	2.10%
			480	50.9	0.509	2.12%
			1440	52.2	0.522	2.18%





Expansión Libre en probeta	
Azogues	
Volumen inicial	10
Volumen final	11
% de Expansión	10

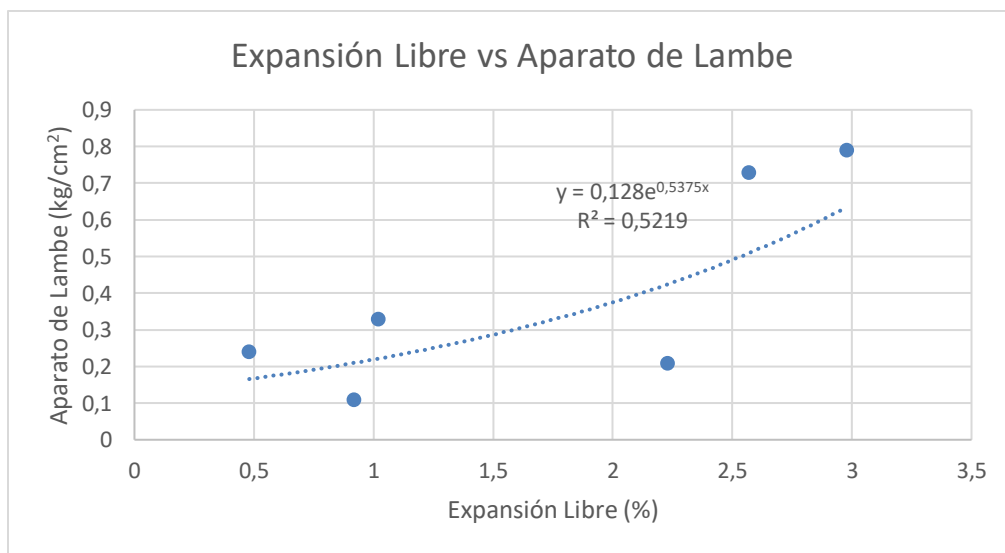
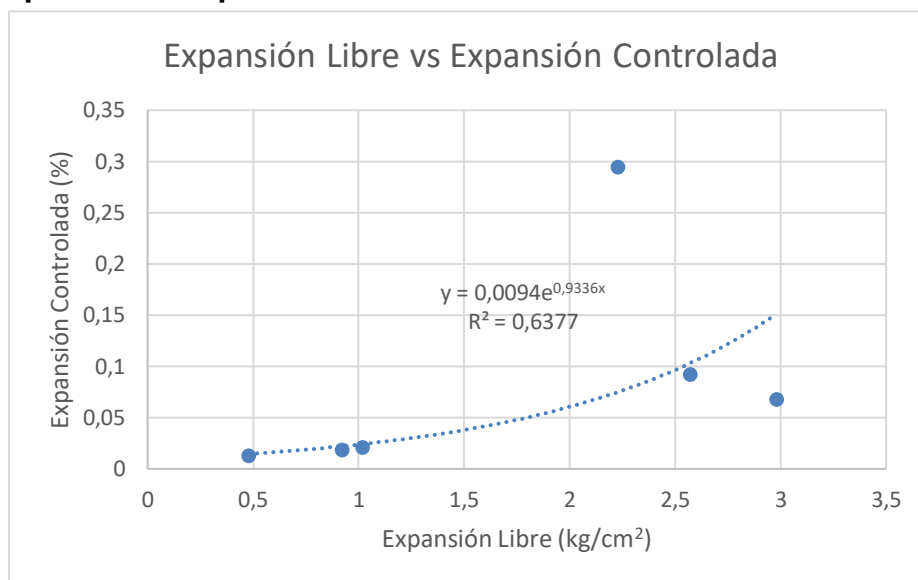


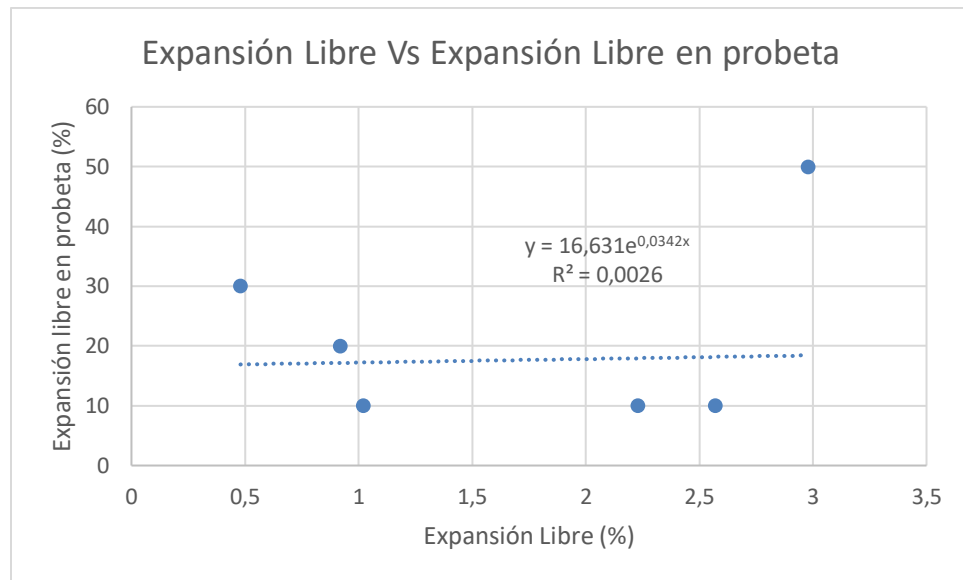


APARATO DE LAMBE					
AZOGUES					
Condición de humedad		LP = 36,2%		Datos de la probeta	
Cantidad de capas		#	1	Diámetro (mm)	70
Cantidad de golpes		#	5	Área (mm2)	3848.45
Tiempo	Lectura del anillo	Fuerza	Índice de Expansión	Cambio Volumétrico	
s	Dinamométrico	N	Mpa		
60	4	43.33	0.011	Marginal	
120	4	43.33	0.011	Marginal	
180	4.1	44.40	0.012	Marginal	
240	4.7	50.80	0.013	Marginal	
300	4.9	52.93	0.014	Marginal	
600	5.2	56.12	0.015	Marginal	
900	5.6	60.36	0.016	Marginal	
1800	6.1	65.65	0.017	Marginal	
3600	7	75.13	0.020	Marginal	
5400	7.3	78.27	0.020	Marginal	
7200	7.7	82.46	0.021	Marginal	

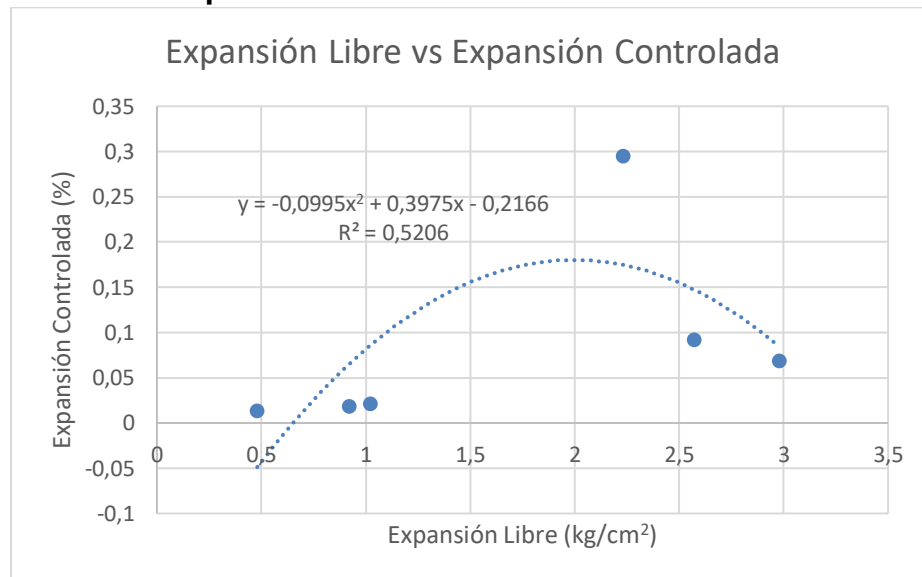
Anexo 4

Ajuste exponencial expansión libre

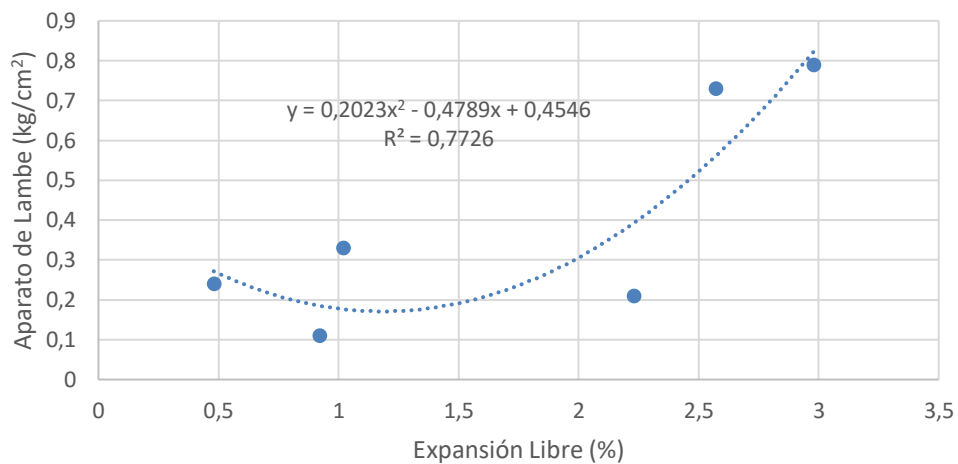




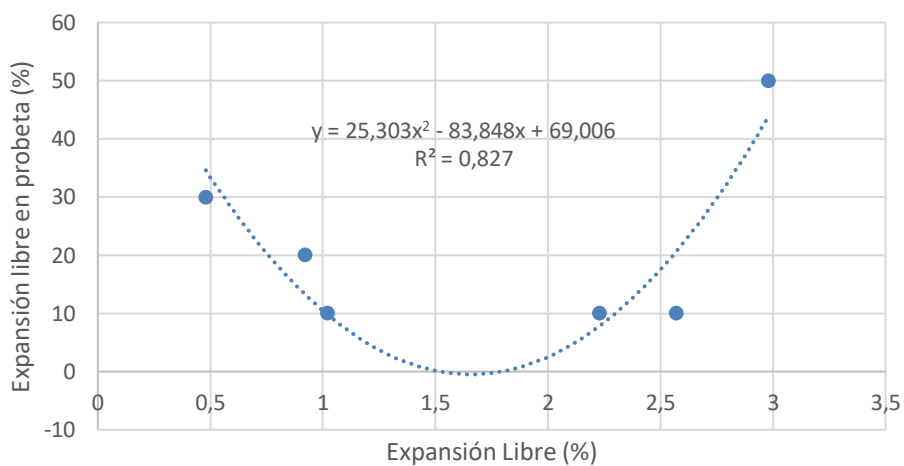
Ajuste polinómico expansión libre



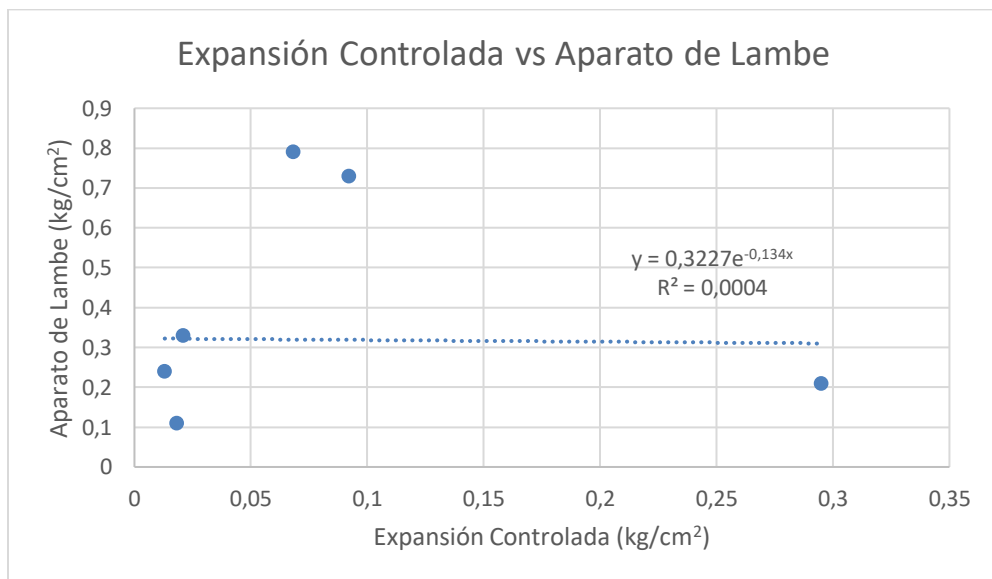
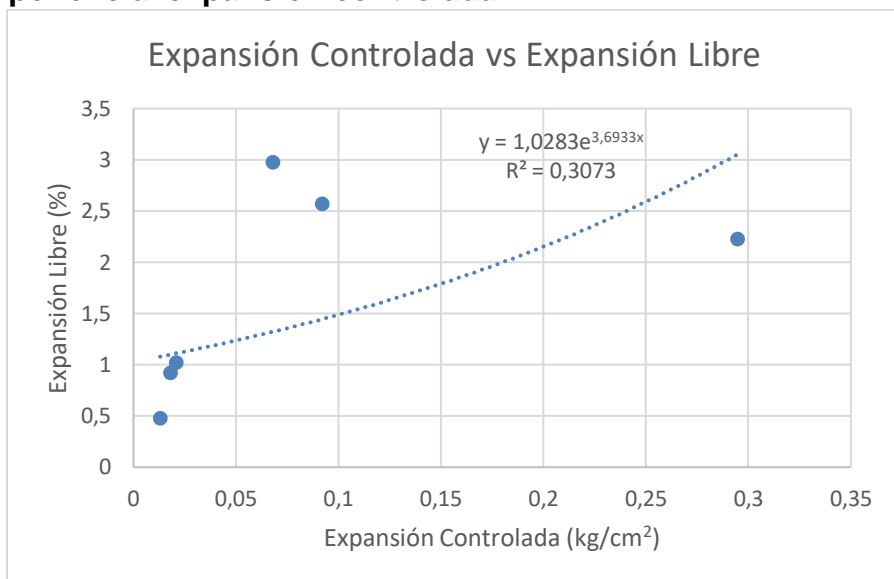
Expansión Libre vs Aparato de Lambe

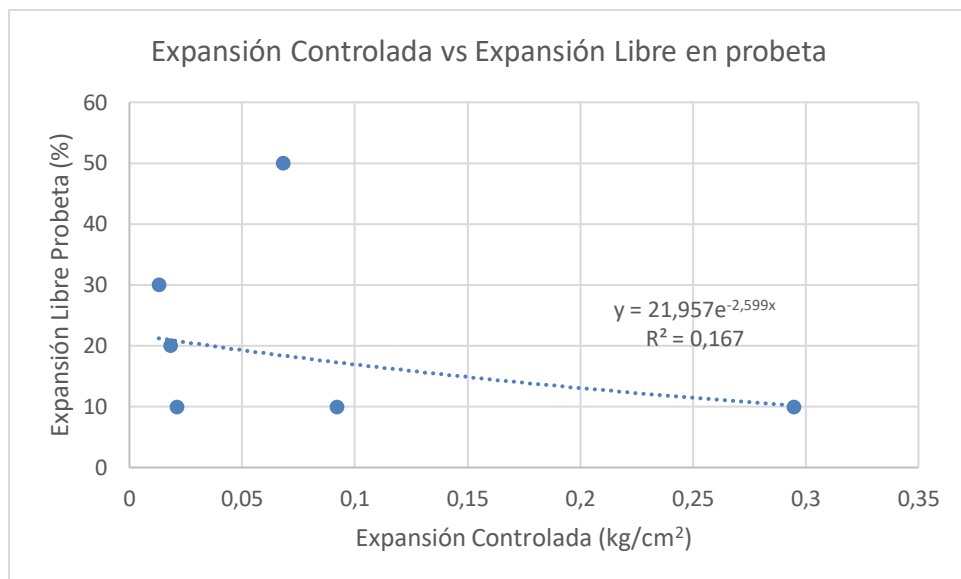


Expansión Libre Vs Expansión Libre en probeta

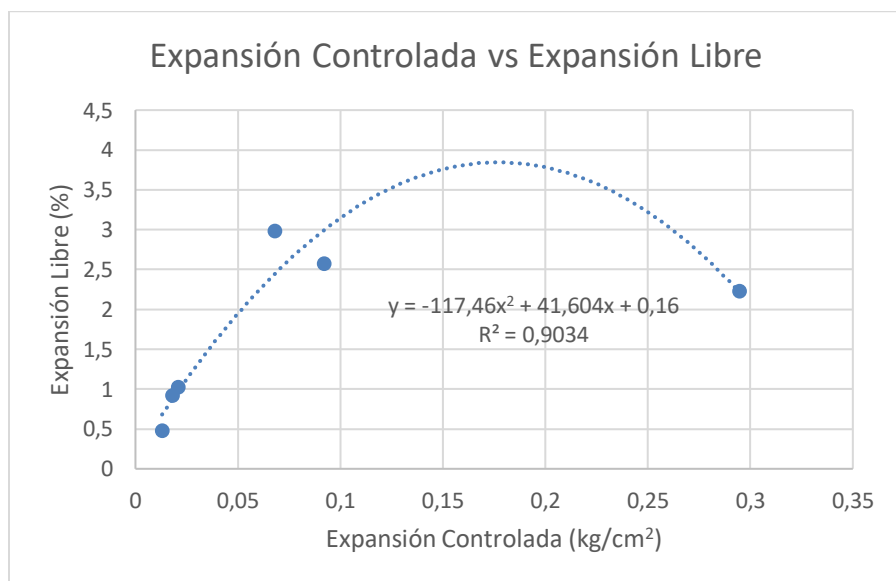


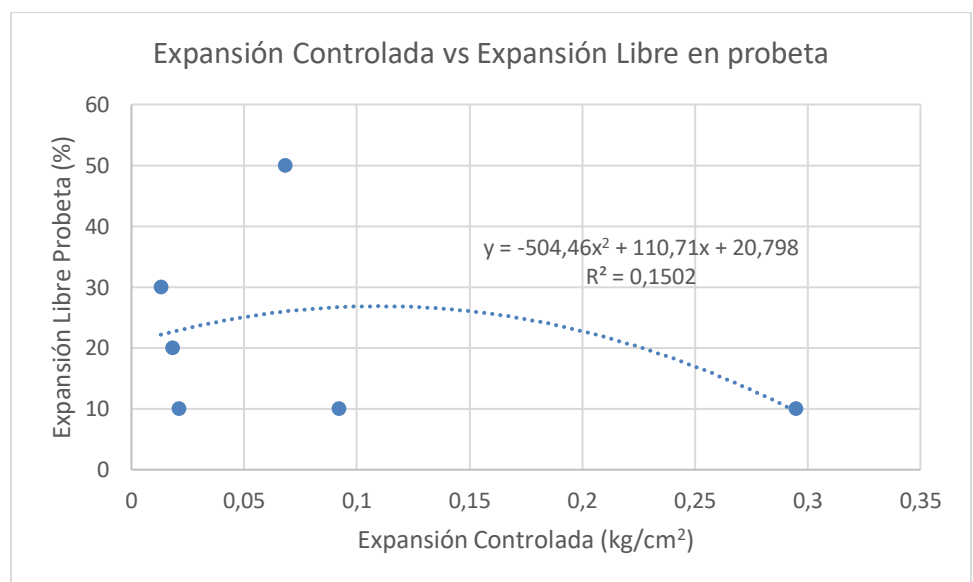
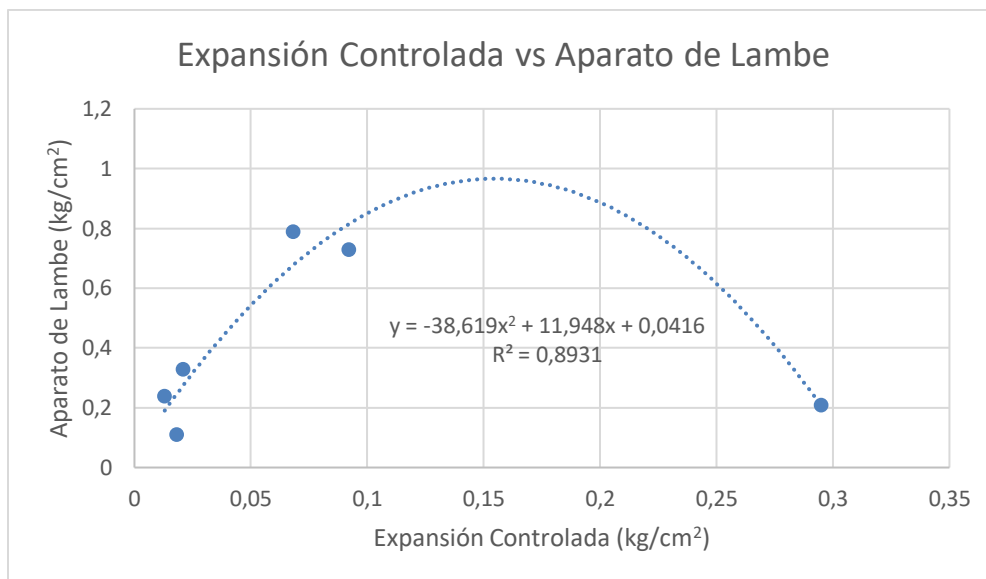
Ajuste exponencial expansión controlada





Ajuste polinómico expansión controlada







Anexo 5

Granulometría



Hidrómetro





Gravedad específica



Límites de Atterberg

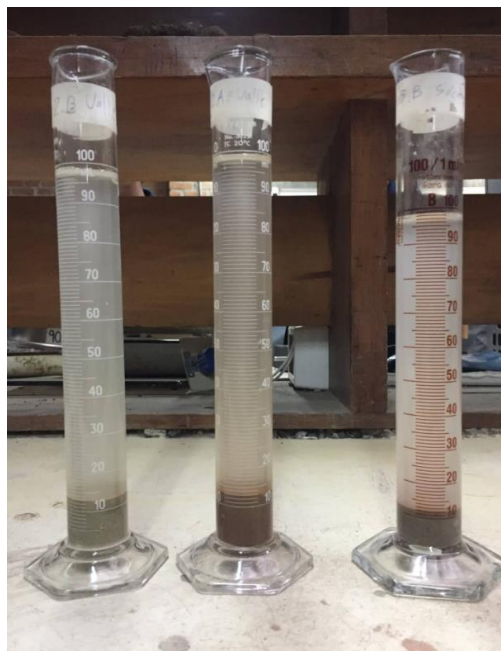




Penetración en cono



Expansión libre en probeta





Expansión controlada



Aparato de Lambe

